

Lari Korkiakoski

## **HANHIKIVI 1 -YDINVOIMALAN JÄÄHDYTYSVEDEN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET**

# **HANHIKIVI 1 -YDINVOIMALAN JÄÄHDYTYSVEDEN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET**

Lari Korkiakoski  
Opinnäytetyö  
Syksy 2015  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka, energiatekniikka

---

Tekijä: Lari Korkiakoski

Opinnäytetyön nimi: Hanhikivi 1 -ydinvoimalan jäähdytysveden hyödyntämismahdollisuudet

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari, Minttu Hietamäki

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2015 Sivumäärä: 80 + 10 liitettä

---

Tämä työ käsittelee Hanhikivi 1 -ydinvoimalan jäähdytysveden mahdollisia käyttökohteita, joissa mereen menevää lämpöenergiaa saadaan kannattavasti hyödynnettyä. Työssä on tuotu esille ideoita käyttökohteiksi sekä selvitetty alustavasti käyttöideoiden taloudellista kannattavuutta.

Työ toteutettiin teoriapohjaisena tutkimuksena, jossa esitettyjen ideoiden hyödykäyttöä tarkasteltiin kriittisesti ja laskettiin alustavasti taloudellista kannattavuutta. Työssä on esitetty potentiaalisimmat käyttöideat perusteellisesti. Tehtyjen tutkimusten pohjalta työssä on annettu suosituksia niistä käyttökohteista, joihin kannattaa perehtyä tarkemmin, mikäli ideoita halutaan toteuttaa käytännössä.

Työn tuloksen mukaisesti yksinkertaisin vaihtoehto jäähdytysveden lämmölle on johtaa se talvella jäähdytysveden imukanavaan olosuhteissa, joissa alijäähtynyt vesi voi muodostaa imukanan tukkivan supon. Toinen potentiaalinen vaihtoehto on käyttää jäähdytysveden lämpöenergiaa lämpöpumpun avulla laitosalueen rakennusten lämmitykseen, jolloin primäärienergian kulutusta voidaan säästää huomattavasti. Lämpöpumpun avulla jäähdytysveden lämpöenergiaa voidaan hyödyntää kannattavasti myös muissa paljon lämpöenergiaa vaativissa kohteissa kuten biokaasulaitoksessa. Lämpöä käyttävät kohteet tulee kuitenkin sijoittaa voimalaitoksen välittömään läheisyyteen, jotta toiminta on kannattavaa.

---

Asiasanat: energiatehokkuus, hukkalämpö, lämpöpumppaus, jäähdytysvesi, ydinvoima

## **ALKULAUSE**

Aiheena Hanhikiven jäähdytysveden hyödyntämisen suunnittelu oli minulle mielenkiintoinen ja motivoiva. Työtä tehdessäni pystyin hyödyntämään opintojeni aikana kerryttämiäni ammatillisia tietoja ja taitoja. Ensimmäisenä haluaisin kiittää toimeksiantajan edustajaa ydintekniikan asiantuntijaa Minttu Hietamäkeä tämän työn toteuttamisen mahdollistamisesta ja asiantuntemuksesta sekä opettajaani Jukka Ylikunnaria ohjauksesta ja neuvonnasta. Haluan myös kiittää avopuolisoani Millaa hänen antamastaan tuesta.

12.11.2015 Lari Korkiakoski

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 HANHIKIVI 1 -YDINVOIMALA	8
2.1 Ydinvoimalaitoksen toimintaperiaate	8
2.1.1 Reaktori	9
2.1.2 Primääri- ja sekundääripiiri	9
2.1.3 Merivesipiiri	10
3 JÄÄHDYTYSVEDEN HYÖDYNTÄMINEN	12
3.1 Ydinvoimalan hukkaenergian hyödyntäminen maailmalla	12
3.2 Jäähdytysveden hyödyntämisen kannattavuus	13
3.3 Jäähdytysveden lämpöenergian hyödyntäminen lämpöpumpulla	13
3.3.1 Lämpöpumpun käyttö lämmitysveden tuotantoon	14
3.3.2 Lämpöpumpputyypit	15
3.4 Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate	16
3.4.1 Mekaanisen lämpöpumpun carnot-lämpökerroin	17
3.4.2 Todellinen lämpöpumppu	17
3.5 Absorptiolämpöpumput	21
3.5.1 Absorptiolämpöpumpun toiminta	22
3.5.2 Jäähdytysveden hyödyntäminen absorptiopumpulla	23
4 LÄMMÖN KÄYTTÖKOHTEIDEN KARTOITUS	25
4.1 Laitoksen kiinteistöjen lämmitys	25
4.1.1 Lämpöpumppauspotentiaali	30
4.1.2 Lämmitysenergian tarve laitoksen kiinteistöissä	34
4.1.3 Lämmitystehontarve	37
4.1.4 Käyttöveden lämmitys	39
4.1.5 Lämpöpumppauksen kannattavuuden arviointi	41
4.1.6 Lämpöpumppulaitteiston investointikustannukset	46
4.2 Lämpöakku	48
4.3 OTEC	50

4.4 Pihojen sulatus talvella	52
4.4.1 Sulanapidon hyötyjen ja haittojen vertailu	52
4.4.2 Sulatuksen perusteet	53
4.5 Jäähdytysveden ottokanavan sulanapito talviaikaan	54
5 KÄYTTÖKOhteita LAITOSALUEEN ULKOPUOLELLA	57
5.1 Käyttö kaukolämpönä	57
5.2 Asuinalueen lämmitys	57
5.3 Kasvihuoneen lämmitys	58
5.3.1 Suomalaiset kasvihuoneet	58
5.3.2 Kasvihuoneen lämmitysratkaisut	59
5.3.3 Jäähdytysveden hyödyntämistä lämpöpumpulla kasvihuoneessa	59
5.4 Biopolttoaineen kuivatus	62
5.4.1 Hakkeenkuivatus	62
5.4.2 Jäähdytysveden käyttö hakkeenkuivaukseen	63
5.5 Biokaasun tuotantoon	65
5.5.1 Biokaasu	66
5.5.2 Lämpöpumppaus biokaasuvoimalaan	67
5.5.3 Biokaasun käyttö	70
5.6 Urheilupuiston lämmitys	73
6 YHTEENVETO	74
LÄHTEET	76
LIITTEET	81

# 1 JOHDANTO

Fennovoima Oy rakentaa Pyhäjoen Hanhikivenniemelle Hanhikivi 1 -ydinvoimalaitoksen. Hanhikivi 1 tulee käynnissä ollessaan tuottamaan 3 200 MW:n lämpötehon, josta saadaan sähköntuotantoon hyödynnettyä noin 1 200 MW:n teho. Ylijäävä lämpöteho eli noin 2 000 MW johdetaan jäähdytysveden mukana mereen. (1, s. 31.) Tämän työn tavoitteena on ideoida ja tutkia vaihtoehtoisia tekniikoita sekä käyttökohteita, jotta mereen johdettavaa lämpöenergiaa voitaisiin kannattavasti hyödyntää. Fennovoima Oy:n on mahdollista tutkia ja suunnitella työssä esitettyjä käyttöideoita enemmän sekä mahdollisesti hyödyntää niitä käytännössä.

Käyttökohteiden suunnittelu aloitettiin keräämällä tietoa eri käyttökohteista, joihin voitaisiin hyödyntää suurta määrää matalalämpöistä energiaa. Suurimmaksi haasteeksi käyttökohteita suunniteltaessa voi muodostua jäähdytysveden matala lämpötila, joka on vuodenajasta riippuen vain 10–12 °C meriveden lämpötilaa korkeampi (1, s. 125). Jäähdytysveden matalan lämpötilan vuoksi on myös mietittävä vaihtoehtoisia tapoja muuttaa jäähdytysveden lämpöenergiaa käyttökelpoisempaan muotoon, jolloin mahdollisten käyttökohteiden määrä on suurempi. Käyttökohteiden suunnittelussa tulee huomioida myös ydinvoimalan turvaetäisyyden vaikutus. Turvaetäisyys asettaa rajoituksia voimalaitoksen läheisyyteen rakentamiseen, mikä rajoittaa mahdollisia käyttökohteita.

Jäähdytysveden hyötykäyttöä on aiemmin pohdittu ja suunniteltu suhteellisen paljon, mutta laajamittaista hyödyntämistä ei toistaiseksi ole toteutettu osittain aiemmin mainittujen ongelmien takia. Jäähdytysveden lämpöenergian hyötykäyttöä on rajoittanut myös se, ettei lämmölle ole ollut lähistöllä käyttökohteita, joissa lämpöä olisi voinut hyödyntää.

## **2 HANHIKIVI 1 -YDINVOIMALA**

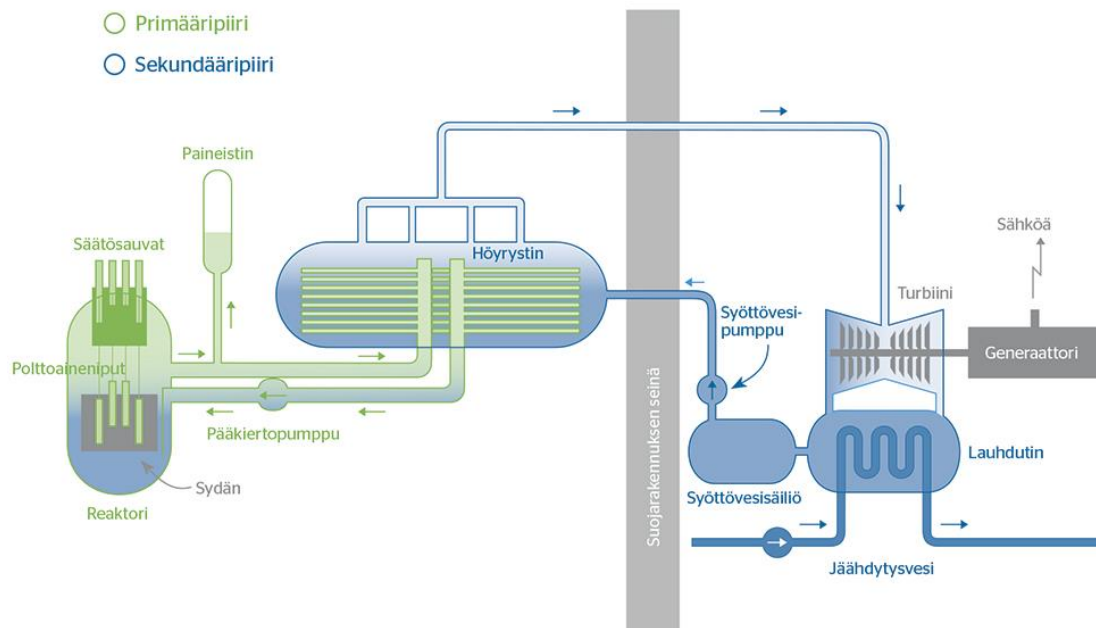
Fennovoima Oy rakentaa Pyhäjoelle ydinvoimalaitoksen, jonka laitostoimituksesta vastaa venäläinen Rosatom. Laitoksen tämänhetkinen nimi on Hanhikivi 1. Laitos tulee olemaan tyypiltään AES-2006-painevesilaitos, joka on moderni kolmannen sukupolven ydinvoimalaitos. Laitoksen tekniikka perustuu 40 vuotta kehityksessä ja käytössä olleeseen VVER-teknologiaan, jonka uusin kehitysversio Hanhikivi 1 tulee olemaan. (1, s. 10.)

Hanhikiviniemi, johon laitos rakennetaan, sijaitsee noin 20 km etäisyydellä Raahesta ja noin 100 km etäisyydellä Oulusta (1 s. 13). Pitkät etäisyydet suuriin asukaskeskuksiin tekevät lämmön siirtämisen niihin vaikeiksi ja kalliiksi. Toisaalta myös Raahen ja Oulun kaukolämmön tuotannossa hyödynnetään omaa paikallisen teollisuuden ylijäämälämpöä, mikä vähentää lämmön siirtämisen kannattavuutta näille alueille. Näiden seikkojen vuoksi tämän työn tarkastelua rajataan siten, että jäähdytysveden lämmölle mietitään käyttökohteita paikallisesti noin 10 km:n säteellä laitoksesta.

### **2.1 Ydinvoimalaitoksen toimintaperiaate**

Hanhikivi 1 -ydinvoimalaitoksessa sähkö tuotetaan samoin toimintaperiaattein kuin missä tahansa lauhdevoimalassa: kuumentamalla vesi höyryksi ja pyörittämällä sen avulla turbiinia, joka on kytketty sähköä tuottavaan generaattoriin. Perinteisistä voimalaitoksista Hanhikivi eroaa lämmönlähteeltään, sillä ydinvoimaloissa lämpö tuotetaan fissioreaktion avulla polttoaineen polttamisen sijaan. Hanhikiven tuleva ydinreaktori on tyypiltään painevesireaktori. Reaktorissa kiertää tavallista vettä, joka pidetään korkeassa paineessa höyrystymisen estämiseksi. (Kuva 1.) (2.) Hanhikivelle rakennettavassa AES-2006-ydinvoimalaitoksessa turbiinin avulla saadaan reaktorissa tuotetusta 3 200 MW:n lämpötehosta muutettua sähköksi noin 37 %, joka vastaa noin 1 200 MW:n sähkötehoa. Ylijäävä lämpöteho, eli noin 2 000 MW, siirretään mereen jäähdytysveden mukana. (1, s. 31.)





KUVA 1. Painevesireaktorin toimintaperiaate (1, s. 53)

### 2.1.1 Reaktori

Fissioreaktio on atomitasolla tapahtuva atomin halkeaminen, jossa halkeavasta polttoaineatomista vapautuu valtava määrä lämpöä sekä kaksi tai useampia nopeaa neutronia. Hidastuessaan neutronit voivat halkaista uusia polttoaineatomeja. Hidastinaaineena painevesireaktorissa käytetään vettä, joka samalla jäähdyttää ydintä. Itsensä ylläpitävä ketjureaktio saavutetaan, kun jokaista fissiota kohden tuotetaan yksi hidas neutroni, joka halkaisee uuden polttoaineatomin. (3, s. 234–235.)

Ketjureaktiota hallitaan ytimestä sisään ja ulos liikkuvilla säätösauvoilla. Säätösauvat valmistetaan neutroneita voimakkaasti absorboivasta materiaalista. Reaktorin sisään työnnettynä ne absorboivat neutroneita niin, ettei ketjureaktio jatku itsenäisesti. Oikeassa asennossa ollessaan säätösauvat sallivat hallitun ja jatkuvan ketjureaktion, jolloin lämmöntuotanto tasaista. (3, s. 234–235.)

### 2.1.2 Primääri- ja sekundääripiiri

Ydinreaktiossa syntynyt lämpö siirtyy hidastinaaineena toimivaan veteen, jonka paine pidetään korkeana 162 bar:ssa. Korkean paineen takia noin 330-celsius-

asteinen vesi ei pääse kiehumaan korkeasta lämpötilasta huolimatta (2). Painetta ylläpidetään ja säädetään erillisessä paineistimessa, jossa paineen säätö tapahtuu säätelemällä siellä olevan veden lämpötilaa (3, s. 244). Ydinreaktorissa kiertävän korkeapaineisen veden piiriä kutsutaan primääripiiriksi, josta lämpö siirretään höyrystimen suurilla lämmönvaihtimilla sekundääripiiriin.

Koska primääripiirin vesi täytyy pitää nestemäisenä, ei sen lämpötilaa voida nostaa yli kriittisen pisteen, jonka ylittyessä vesi höyrystyisi korkeasta paineesta huolimatta. Tämän rajoitteen vuoksi on painevesireaktorin sekundääripiiriin tuotettu höyry kylmempää kuin lauhdevoimaloissa, joissa tuorehöyryn lämpötila on yleensä yli 500 °C (3, s. 90). Höyrystimessä sekundääripiirin matalapaineisempi noin 68 bar vesi höyrystyy 283-celsiusasteiseksi kylläiseksi höyryksi, joka johdetaan turbiiniin. Höyry johdetaan ensin korkeapainepuolelle, jossa se paisuu ja jäähtyy pyörittäen turbiinia. Korkeapainepuolen jälkeen matalapaineista 5,4 bar höyryä tulistetaan päähöyrylinjasta saatavan höyryn avulla noin 260 °C:seen. Tulistettu höyry johdetaan turbiinin matalapaineosaan, jossa paine ja lämpötila laskevat luovuttaen lisää energiaa turbiinin pyörintäliikkeeksi. (4.)

### **2.1.3 Merivesipiiri**

Matalapaineturbiinin jälkeen höyry virtaa lauhduttimeen. Lauhdutin on valtava lämmönsiirrin, jossa sekundääripiirin höyry lauhdutetaan vedeksi kylmän meriveden avulla. Hyötysuhteen maksimoimiseksi lauhduttimen lämpötila pyritään saamaan alhaiseksi, jolloin lauhduttimen paine laskee mahdollisimman matalaksi ja höyryä voidaan paisuttaa turbiinissa pidempään. (3, s. 247–248.) Lauhduttimen matalan lämpötilan vuoksi, lämpenee jäähdytyksessä käytettävä merivesi vain 10–12 °C laitoksen läpi kulkiessaan. Jäähdytysveden virtausmäärä on kuitenkin valtava, noin 45 m<sup>3</sup> sekunnissa. (1, s. 13.)

Ydinvoimalassa jäähdytysveteen sitoutuu valtava lämpöteho, jota ei kuitenkaan voida hyödyntää kuten vastapainevoimalaitoksissa, joissa lauhduttimessa vallitseva paine tiivistää höyryn vedeksi korkeammassa lämpötilassa. Näin ollen korkeampi lauhduttimen lämpötila mahdollistaa vastapainelaitoksissa kaukolämmön tuotannon. (3, s. 22.) Vastapaineen vaikutuksesta turbiinin teho kuitenkin

laskee huonontaen sähköntuotannon hyötysuhdetta, jonka takia ydinvoimaloissa ei hyödynnetä ylijäävää lämpöä, sillä niissä pyritään maksimoimaan tuotetun sähkön määrä.

### 3 JÄÄHDYTYSVEDEN HYÖDYNTÄMINEN

Voimalaitoksesta tulevan jäähdytysveden lämpötila on suoraan verrannollinen meriveden lämpötilaan, sillä laitoksen läpi virratessaan se lämpenee vain noin 10–12 °C, mikä tekee lämpöenergian hyödyntämisen haastavaksi. Suomen olosuhteissa meriveden lämpötila vaihtelee vuoden ajasta riippuen voimakkaasti, minkä takia myös jäähdytysveden lämpötila vaihtelee vuodenajan mukaan. Vuosina 2009–2013 korkein mitattu merivedenlämpötila Hanhikiven niemen edustalla on ollut 18,7 °C. Pidemmällä aikavälilläkään ei ole havaittu yli 20 °C:n lämpötiloja. Talviaikaan meriveden lämpötila voi suolapitoisuuden vuoksi laskea meriveden jäätympisteeseen –0,2 °C:seen. (1, s. 124.)

Merestä otettavan jäähdytysveden lämpötilaan vaikuttaa myös laitoksesta tuleva lämmennyt vesi, joka nostaa simulointien mukaan pintaveden lämpötilaa myös vedenotto paikalla muutamilla asteilla. Syvempiin vesikerroksiin, eli noin 4–11 metrin syvyyteen, josta jäähdytysvesi pumpataan (1, s. 131), ei lämmenneellä vedellä oleteta olevan vaikutusta (1, s. 135). Näiden tietojen perusteella voidaan arvioida laitoksen normaalin käynnin aikana mereen laskettavan jäähdytysveden lämpötilan vaihtelevan vuoden aikana välillä +10...+30 °C.

Laitoksesta tulevan jäähdytysvesi sisältää paljon lämpöenergiaa, mutta matalan lämpötilan vuoksi on sen exergiakin matala. Matalan exergian takia veden hyödyntäminen suoraan eri käyttötarkoituksiin on haastavaa. Suuri lämpöenergian määrä selittyykin suurella virtauksella, joka on noin 45 m<sup>3</sup>/s. Esimerkiksi kaukolämmitys suoraan jäähdytysveden lämpöä hyödyntämällä ei ole mahdollista, koska sen lämpötila on liian matala.

#### 3.1 Ydinvoimalan hukkaenergian hyödyntäminen muissa laitoksissa

Matalan lämpötilan vuoksi maailmalla toimivissa ydinvoimaloissa ei juurikaan ole hyödynnetty hukkaan menevää lämpöenergiaa pieniä kokeellisia projekteja lukuun ottamatta. Esimerkiksi Olkiluodon ydinvoimalassa on kokeiltu kylmänarokojen kasvien kuten sokerimaissin, vesimelonin ja viinirypäleiden kasvatusta jäähdytysvedellä lämmitetyssä maaperässä. Heikkojen tulosten takia on kokeiluista kuitenkin luovuttu. Olkiluodossa on myös tällä hetkellä meneillään kokeilu,

jossa täplärapujen sekä muutamien kalalajien kasvatusta jäähdytysvedellä lämmitetystä vedessä tutkitaan. Ainakin täplärapujen kasvatuksessa on lämmön avulla saatu niiden kasvua nopeutettua. (5.)

### **3.2 Jäähdytysveden hyödyntämisen kannattavuus**

Jäähdytysveden hyödyntämistä suunniteltaessa on olennaista miettiä saatavia hyötyjä verrattuna syntyviin kustannuksiin. Investointi lämmön hyödyntämisen vaatimaan tekniikkaan on suurin yksittäinen kuluerä. Tämän kuluerän takaisinmaksuaika sanelee hyvin pitkälti projektin kannattavuuden.

Jäähdytysveden lämpöenergian hyödyntämistä on ajateltava mahdollisuutena säästää laitoksen kokonaiskustannuksissa ja primäärienergian kulutuksessa (6). Kustannussäästöä syntyy, kun hukkaenergian hyödyntämiskustannukset ovat pienemmät verrattuna siihen, miten kyseinen energia tuotettaisiin muilla keinoin. Käyttökohteiden suunnittelun yhteydessä on laskettu arvioita syntyvistä kuluista ja saatavasta hyödystä, jotta voidaan arvioida suurpiirteisesti jäähdytysveden hyötykäytön kannattavuutta.

### **3.3 Jäähdytysveden lämpöenergian hyödyntäminen lämpöpumpulla**

Lämpöpumppujen suosio on viime vuosina kasvanut. Suosion kasvaminen johtuu niiden kyvystä tuottaa edullista lämpöä hyödyntämällä esimerkiksi maaperän lämpöä rakennusten lämmitykseen. (7.) Lämpöpumput ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia sekä varmatoimisia, ja niitä käytetään maailmalla moniin eri sovelluksiin, kun halutaan tuottaa kuumaa tai kylmää lämpövirtaa.

Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuus voidaan määritellä saatavan lämmön ja lämpöpumpun ottaman käyttöenergian hintaerolla. Mikäli ero on pieni ja saatavat lämpömäärät vähäisiä, voi investoinnin takaisinmaksuaika kasvaa erittäin pitkäksi, jolloin investointi on kannattamaton. Lämpöpumppuinvestointia suunniteltaessa on olemassa reunaehdoja, joiden täytyessä voidaan lämpöpumpun päätellä olevan lähtökohtaisesti kannattava investointi. (8, s. 16.)

Lämpöpumppaus on kannattavaan, kun

1. lämpöpumppu luovuttaa lämpöenergiaa siinä muodossa, että se voi korvata ostoenergiaa
2. lämpöpumpun käyttöön vaadittu energia maksaa vähemmän kuin pumpulla tuotettu energia
3. lämpöpumppulaitteistoon tehdyn investoinnin takaisinmaksuaika on riittävän lyhyt. (8, s. 16.)

### **3.3.1 Lämpöpumpun käyttö lämmitysveden tuotantoon**

Lämpöpumpuissa voidaan käyttää hyödyksi matalalämpöistä ylijäämälämpöä, jota on ympäristössä runsaasti saatavilla mutta jonka lämpötila on liian matala sen hyödyntämiseen suoraan kohteessa. Lämpöpumpun avulla matalalämpöisen ylijäämälämmön sisältämä energia hyödynnetään käyttökelpoisen lämmön tuottamiseen. (8, s. 15.) Lämpöpumpulla on mahdollista hyödyntää Hanhikiven ydinvoimalan jäähdytysvettä eri tarkoituksiin, esimerkiksi kiinteistöjen lämmitykseen. Laitoksesta tuleva jäähdytysveden lämpötila vaihtelee 10–30°C:n välillä (1, s. 123). Tällainen jäähdytysvesi soveltuu erinomaisesti lämpöpumpulla hyödynnettäväksi lämmönlähteeksi. Lämpöpumpulla voitaisiin tuottaa lämpöä myös niissä tilanteissa, kun laitos ei ole käynnissä, esimerkiksi huoltokatkoksen aikana, sillä lämpöpumpulla voidaan hyödyntää jopa 0 °C:n lämpötiloja. Näissä tapauksissa lämpöpumpun hyötysuhde kuitenkin laskee.

Lämpöpumpulla jäähdytysveden lämpöenergiaa voitaisiin siirtää käyttökelpoisempaan muotoon sen sijaan, että se johdettaisiin suoraan vesistöön ilman minkäänlaista hyödyntämistä. Teoriassa lämpöpumpulla voitaisiin hyödyntää valtavat määrät mereen laskettavasta 2 000 MW:n lämpötehosta, mutta koska käyttö rajoittuu laitoksen omaan ja lähiseudun käyttöön, ei lämpöenergian määrästä voida hyödyntää kuin murto-osa. Markkinoilla on tarjolla eri tehoisia ja eri käyttötarkoituksiin sopivia lämpöpumppuja. Yksittäisten teollisten lämpöpumpujen lämpötehot vaihtelevat 0–1 000 kW:n välillä, mutta lämpöpumppuyksiköitä voidaan myös kytkeä rinnakkain. Rinnakkain kytkemällä niitä voidaan käyttää senhetkisen lämmitystehon tarpeen mukaan.

Lämpöpumpun valintakriteereiksi voidaan asettaa seuraavia ehtoja:

- Tuotettu lämpövirta soveltuu käyttökohteisiin, joissa vaaditaan 20–80°C:n lämpötilaa.
- Lämmöntalteenotto vedestä ja siirto veteen tai ilmaan.
- Laitteisto kykenee hyödyntämään lämmönlähteen muuttuvia +10 °C ...+30 °C:n lämpötiloja.
- Lämpöpumpulla tuotetun lämpövirran lämpötilaa voidaan säätää tarpeen mukaan.
- Jäähdytysveden hyödyntäminen on kannattavampaa kuin muilla lämmitysmuodoilla toteutettu lämmitys.

Esimerkkinä matalalämmön hyödyntämisestä lämpöpumppauksella toimii Turku Energian Kakolanmäen lämpöpumppulaitos, jossa tuotetaan kaukolämpöä ja kaukokylmää noin +10 ...+ 18 °C:n jäteveden lämpöenergiasta. Lämmön tuoton maksimi teho on 18 MW ja kylmän tuoton 10 MW, ja lämpösuhteeksi, eli COP-luvuksi, ilmoitetaan 3,2. (9.) Turku Energian tapaus on hyvä vertailukohta, sillä siellä hyödynnettävän lämmönlähteen lämpötila on samaa luokkaa kuin Hanhikiven jäähdytysvesi. Tästä syystä voidaan arvioida, että myös voimalaitoksen jäähdytysveden lämpöenergiaa voidaan hyödyntää lämpöpumppauksen avulla kannattavasti. Ydinvoimalan jäähdytysvettä hyödyntämällä voitaisiin saavuttaa myös parempi COP-luku, sillä lämmönlähteen lämpötila on korkeampi.

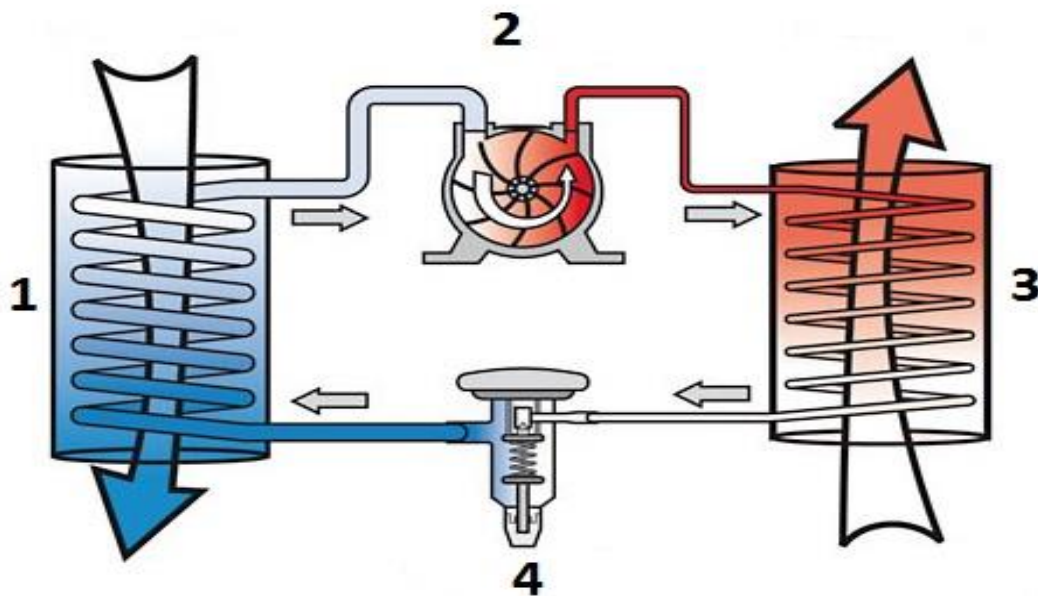
### **3.3.2 Lämpöpumpputyypit**

Lämpöpumput voidaan jakaa karkeasti kahteen eri kategoriaan: avoimen kierron ja suljetun kierron lämpöpumppuihin. Avoimen kierron pumput voidaan perustellen jättää tarkastelun ulkopuolelle, sillä ne soveltuvat vain kaasumaisten aineiden, esimerkiksi höyryn, lämmönkorotukseen. Suljetun kierron lämpöpumput voidaan vielä jakaa eri kategorioihin toimintaperiaatteiden mukaisesti: mekaanisiin kompressorilämpöpumppuihin sekä absorptiolämpöpumppuihin. (10, s. 16.)

### 3.4 Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate

Mekaanisen lämpöpumpun toiminta perustuu laitteen koneistossa kierrätettävän kylmäaineen matalassa paineessa ja lämpötilassa tapahtuvaan höyrystymiseen sekä höyrystimessä lämmenneen ja korkeampaan paineeseen pumpatun höyryn lauhtumiseen takaisin nestemäiseksi (11, s. 30).

Kuvassa 2 on esitettyä lämpöpumpun toiminta yksinkertaisimmillaan. Höyrystimelle (1) johdetaan hyödynnettävää matalalämpöä. Höyrystimessä lämpö höyrystää matalassa paineessa olevan kylmäaineen. Höyrstyessään kylmäaine siirto lämpöenergiaa ympäristöstään, eli tässä tapauksessa ydinvoimalan jäähdytysvedestä. Höyrystimestä kylmäaine imetään kompressorin (2), jossa kylmäaineen lämpötila ja paine nousevat. Kompressorin jälkeen kylmäaine johdetaan lauhduttimeen (3), jossa höyry lauhtuu nestemäiseen muotoon samalla luovuttaen lämpöä lämmityskohteeseen. Lauhduttimessa nesteeksi lauhtunut kylmäaine johdetaan takaisin höyrystimeen paisuntaventtiilin (4) kautta. Paisuntaventtiilissä painetta lasketaan tasolle, jossa höyrstyminen alhaisessa lämpötilassa on mahdollista. (12, s. 224.)



KUVA 2. Lämpöpumpun toimintaperiaate (13)

Lauhduttimen (3) jälkeen kylmäainetta voidaan alijäähdyttää lauhduttimessa tai erillisessä lämmönvaihtimessa, mikä kasvattaa höyrystimen tehoa. Tehon lisäys



ei kuitenkaan ole yleensä päällimmäisin syy alijäähdytykseen, vaan sillä saavutetaan muun muassa imuhöyryn nestepisaroiden väheneminen, paisuntaventtiilin toiminnan varmistuminen, öljyn kierto parantuminen sekä kylmän imuputken eristämisen tarpeen vähentyminen. (10, s. 81.)

### 3.4.1 Mekaanisen lämpöpumpun Carnot-lämpökerroin

Lämpöpumppujen hyötysuhdetta kuvataan lämpökertoimella eli COP-luvulla, joka kuvaa tuotettua lämpöenergiaa suhteessa laitteiston käyttämään sähköenergiaan. Esimerkiksi jos COP-luku on 5, kuluu 5 kWh:n lämmön tuottamiseen 1 kWh sähköä. Loput 4 kWh saadaan lämpöenergiana lämmönlähteestä. Lämpökertoimen suuruuteen vaikuttaa pääasiassa lämmönlähteen ja lämmitettävän kohteen lämpötilaero. Mitä pienempi lämpötilaero näiden välille saadaan, sitä suurempi lämpökertoimen arvo saavutetaan. (11, s. 32.) Carnot-lämpökerroin ei kuitenkaan kerro todellista tilannetta, vaan teoreettisen lämpökertoimen, jossa lämpöpumpun laitteet toimivat 100 %:n hyötysuhteella ja lämpö- tai painehäviöitä ei ole. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, vaan laitteistossa syntyy aina häviöitä, jotka huonontavat hyötysuhdetta ja näin ollen myös todellista lämpökerrointa. Carnot-hyötysuhde voidaan laskea kaavalla 1 (14, s. 20).

$$\frac{T_L}{T_L - T_H} = COP_C \quad \text{KAAVA 1}$$

$COP_C$  = Carnot-lämpökerroin

$T_L$  = lämpöpumpun lauhtumislämpötila (K)

$T_H$  = lämpöpumpun höyrystymislämpötila (K)

### 3.4.2 Todellinen lämpöpumppu

Todellisessa lämpöpumpussa syntyy useita häviöitä, jotka poikkeavat ideaalisesta prosessista. Laitteiston hyötysuhteeseen merkittävimmin vaikuttavat häviötekijät ovat seuraavat:

1. Kompressorin puristustyö ei ole isentrooppinen eikä adiabaattinen, minkä vuoksi puristustyö kasvaa ja lämpöä siirtyy ympäristöön.
2. Kompressorin venttiileissä syntyy painehäviöitä.
3. Kylmäaine lämpenee imupuolen kanavissa ja venttiileissä.
4. Puristuksen jälkeen höyry kylmenee venttiileissä ja painekanavissa.

5. Lauhduttimessa, höyrystimessä ja putkistoissa syntyy painehäviöitä. (10, s. 70.)

Todellisen lämpöpumpun COP-luku voidaan laskea kaavalla 2 (15, s. 551).

$$\gamma = \frac{Q_{out}/m}{W_c/m} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad \text{KAAVA 2}$$

$h_1$  = kylmäaineen entalpia höyrystimen jälkeen (kJ/kg)

$h_2$  = kylmäaineen entalpia ennen lauhdutinta (kJ/kg)

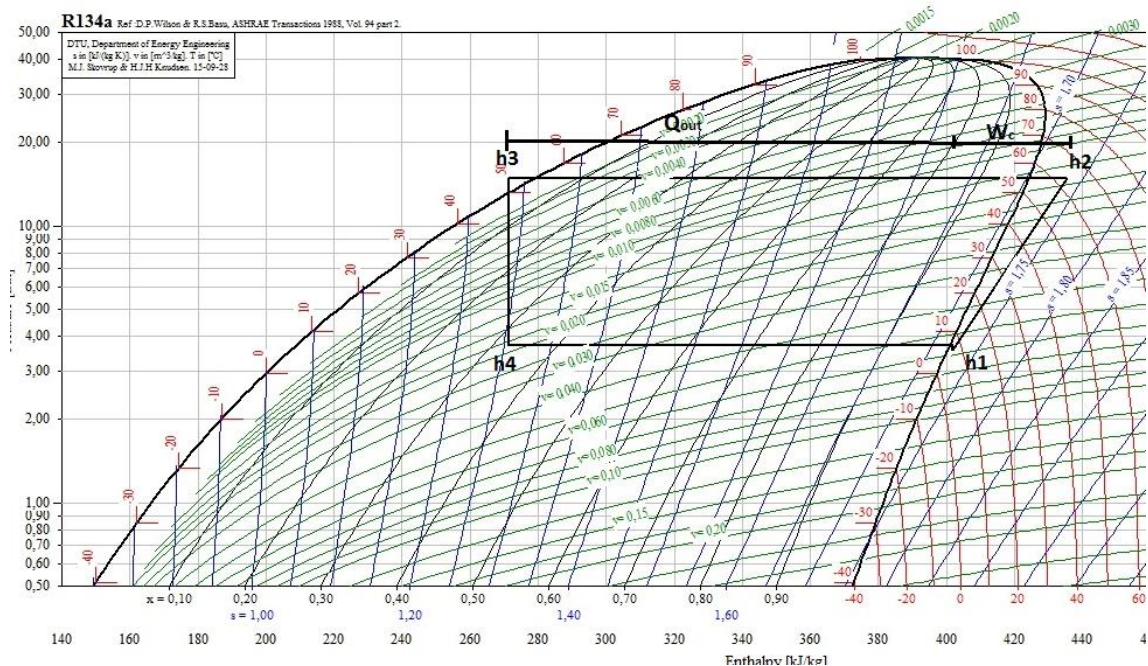
$h_3$  = kylmäaineen entalpia lauhduttimen jälkeen (kJ/kg)

$h_4$  = kylmäaineen entalpia ennen höyrystintä (kJ/kg)

$Q_{out}$  = lauhduttimen teho (W)

$W_c$  = kompressorin teho (W)

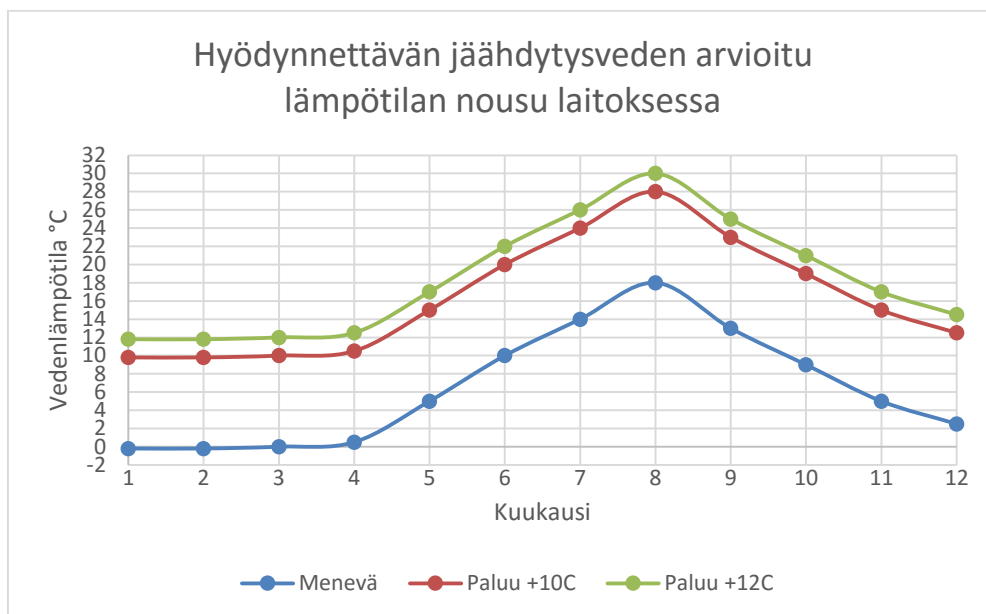
Lämpöpumpppu-prosessi voidaan piirtää myös p-h -diagrammiin (kuva 3), josta voidaan kylmäaineen entalpioiden avulla laskea COP-luku eri lämpötiloissa. Jokaista esimerkkitalanteen laskeminen p-h-diagrammin tai entalpia-aulukon avulla olisi kuitenkin todella työlästä ja epätarkkaa. Sen vuoksi laskentaan on käytetty avuksi Coolpack-ohjelmaa, joka on kehitetty Tanskan teknillisessä korkeakoulussa. Ohjelmalla voidaan laskea useita erilaisia lämpöpumpppu- ja kylmäkoneprosesseja eri tilanteissa (16). Käytettäväksi prosessiksi valittiin yleisesti käytössä oleva yksinkertainen kiertoprosessi kuivapaisuntahöyrystimellä (One-stage cycle DX-evaporator). Kun ohjelmaan syötetään lämmönlähteen lämpötila, tuotettu lämpötila, häviötekijät sekä käytetty kylmäaine, saadaan tuloksena tilanteessa saavutettava COP-luku.



KUVA 3. Lämpöpumpppuolosessi  $p$ - $h$  diagrammissa (16)

Lämpöpumpppuolosessin laskeminen aloitetaan määrittämällä lämpötilatasot ja arvioimalla syntyvien häviöiden määrää. Lämmönlähteen eli jäähdytysveden, ja tuotetun lämmön välinen ero vaikuttaa kaikista merkittävimmin COP-lukuun, joten mitä pienempi lämpötilaero on, sitä paremmalla hyötysuhteella lämpöpumppu voi toimia. Tuotettu lämpötila arvioidaan sen perusteella, mihin käyttö-tarkoitukseen sitä tullaan käyttämään. Lämmönlähteen lämpötila sen sijaan vaihtelee ennustettavasti meriveden lämpötilan mukaan.

Jäähdytysveden lämpötilan tavalliseksi vaihteluväliksi voidaan laitoksen tietojen ja meriveden lämpötilatietojen perusteella arvioida olevan välillä  $+10 \dots +30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Meriveden lämpötilatutkimusten perusteella voidaan tehdä suuntaa-antava kuvaaja (kuva 4), josta selviää vuodenajan vaikutus jäähdytysveden lämpötilaan. Meriveden lämpötilanmittaukset löytyvät YVA-selostuksesta (1, s. 125). Lämpötila mittaukset eivät ole YVA-selostuksessa jokaista kuukautta kattavia, joten puuttuvat arvot saatiin interpoloimalla olemassa olevia mittaustuloksia.



*KUVA 4. Jäähdytysveden arvioitu lämpötilavaihtelu vuodessa (1,s.125)*

Kuvassa 4 nähdään eriteltynä laitoksen sisään ottaman meriveden lämpötila ja laitoksesta poistuvan lämmenneen veden lämpötila. Voimalaitoksessa lämmenneen jäähdytysveden lämpötila on 10–12 °C:ta korkeampi kuin sisään otettaessa. Kaikissa tämän työn laskentaesimerkeissä on kuitenkin oletettu veden lämpenemiseksi miniarvo +10 °C, jotta saatavat tulokset eivät olisi virheellisesti liian optimistisia.

### **Lämpöpumppulaskennassa käytettävät vakiot**

Lämpöpumpun COP-lukuun vaikuttavien muuttujien arvoja joudutaan arvioimaan, sillä niitä ei ole muutoin saatavilla. Vakioituja arvoja on käytettävä laitteiston häviötekijöinä ja muina ominaisuuksina, jotta tämän työn sisällä olevat laskuesimerkit saadaan vertailukelpoisiksi keskenään.

Yksi laitteiston toimintaan vaikuttava tekijä on laitteistossa kiertävä kylmäaine, jonka avulla lämpöä siirretään. Kylmäaineena tämän työn laskentaesimerkeissä käytetään klooritonta HFC 134a:ta, joka tunnetaan myös nimellä R 134a. HCF 134a:ta käytetään yleisesti sen hyvän kylmäkertoimen ja turvallisuutensa vuoksi. Turvalliseksi sen tekee palamattomuus ja hyvin vähäinen myrkyllisyys. (10, s. 115–117.)

Lämpöpumppujen COP-lukua laskiessa täytyy ottaa huomioon lämpö- ja painehäviöt, jotka vaikuttavat lämpöpumpun saatavaan hyötysuhteeseen. Merkittäv in häviö syntyy kompressorissa, jonka puristustyöhön kuluu suurin osa lämpöpumpun kuluttamasta sähköstä. Kompressorin isentrooppiseksi hyötysuhteeksi arvioidaan 80 %, joka todellisessa tilanteessa vaihtelee painesuhteen ja kierrosnopeuden vaikutuksista. Kompressorin lämpöhäviöiksi arvioidaan 10 %, koska puristusprosessi ei ole todellisuudessa adiabaattinen.

Putkistojen painehäviöiden aiheuttamaksi lämpöhäviöksi oletetaan 1 K imu- ja paineputkissa. Lisäksi lauhduttimen jälkeen kylmäainetta alijäähdytetään viidellä kelvin-asteella. Alijäähdytyksestä saatava lämpö voidaan hyödyntää esimerkiksi esilämmitykseen. Höyrystynyt kylmäaine tulistetaan yhdellä kelvin asteella. Näin varmistetaan, ettei kylmäaineeseen jää nestepisaroita, jotka saattavat vaurioittaa kompressoria.

Lauhduttimen ja lämmitettävän nesteen lämpötilaeroksi eli asteisuudeksi voidaan olettaa maalämpöpumpuissa käytettävä arvo 10 K (14, s. 21). Höyrystimen ja lämmönlähteen väliseksi lämpötilaeroksi oletetaan 2,5 K. Kyseinen luku on arvioitu, kun tiedetään maalämpöpumppujen asteisuuden arvo, joka on normaalisti noin 5 K. (14, s. 21). Tässä tapauksessa pienempi asteisuus voidaan säävuttaa veden maaperää paremman lämmönjohtavuuden avulla. Yllä mainittuja hyötysuhteita ja asteisuuksien arvoja käytetään kaikissa tässä työssä olevissa lämpöpumppulaskuissa.

### **3.5 Absorptiolämpöpumput**

Mekaanisen kompressorilämpöpumpun tapaan absorptiolämpöpumppu sitoo matalalämpötilaista lämpöä höyrystimellä ja luovuttaa sitä korkeammassa ja käyttökelpoisemmassa lämpötilassa lauhduttimella (17, s. 11).

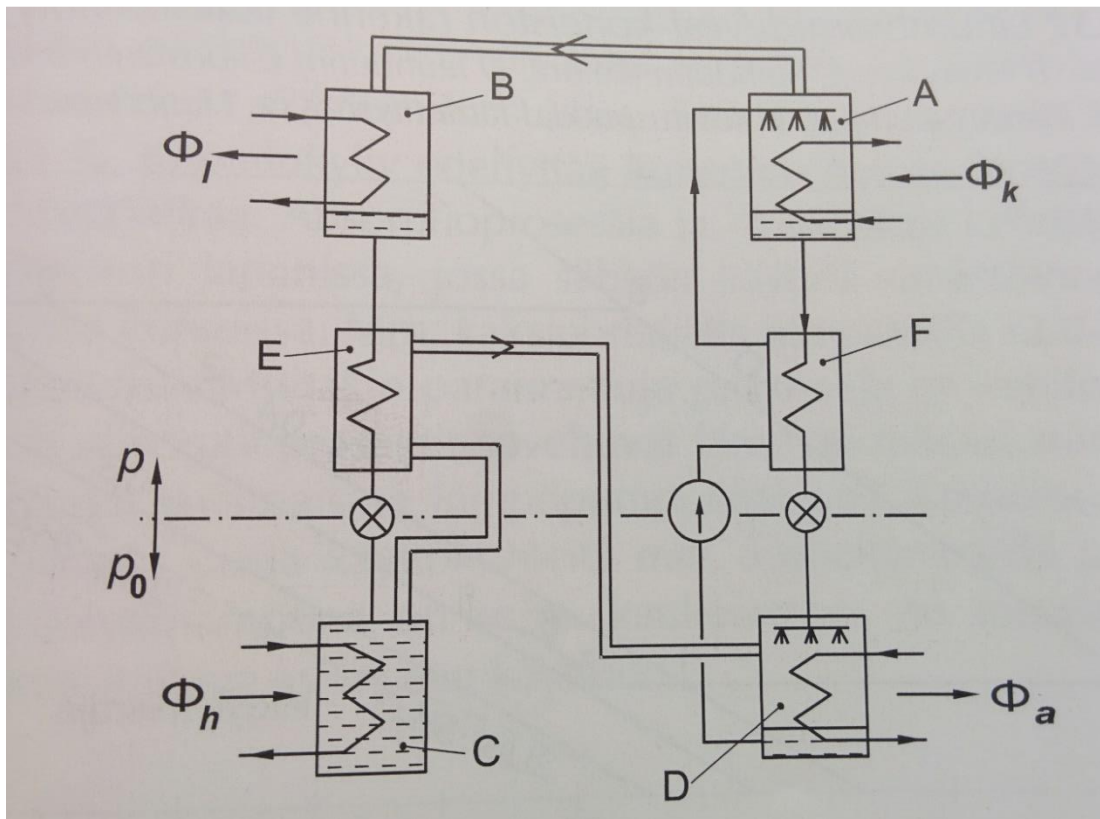
Absorptiolämpöpumppu vaatii toimiakseen ulkoisen energialähteen kuten mekaaninenkin lämpöpumppu, mutta käyttöenergia otetaan sähkön sijaan käyttölämmöstä, jota voi olla esimerkiksi kuuma vesi, höyry tai savukaasu. Käyttölämmön lisäksi tarvitaan myös sähköä liuospumpun toimintaan, mutta sen tarvitsema energianmäärä ei ole merkittävä. (17, s. 19.)

### 3.5.1 Absorptiolämpöpumpun toiminta

Absorptiolaitteiston toiminta perustuu puhtaan kylmäaineen ja absorptioliuoksen höyrypaineiden eroon. Puhdas kylmäaine höyrystyy vakioaineessa matalamassa lämpötilassa kuin absorptioliuoksessa oleva kylmäaine. Tämän vuoksi höyrystimessä matalalämmön avulla höyrystetty kylmäaine imeytyessään absorptioliuokseen nostaa liuoksen lämpötilan kylmäaineen höyrystymispisteeseen. (17,s.11.) Absorptio tarkoittaa kaasun liukenemista nesteeseen. Kaasun liuetessa nesteeseen vapautuu lauhtumislämpöä ja liukenemislämpöä. (10, s. 89.)

Absorptiolaitteiston toimintaa voidaan kuvata virtauskaaviolla. Virtauskaavio kuvaa jatkuvatoimista Carren-prosessia, jossa seosaineina on Ammoniakki  $\text{NH}_3$  ja vesi (kuva 5). Keittimessä (A) on väkevää ammoniakkivesiliuosta, johon tuodaan lämpöä ( $\Phi_k$ ). Lämpö höyrystää keittimessä olevan ammoniakkin. Mukana höyrystyy myös vettä, joka täytyy poistaa refikaattorissa. Höyrystetty ammoniakki johdetaan lauhtuttimeen (B), jossa keittimen paineessa oleva ammoniakkihöyry lauhtuu nestemäiseksi ja luovuttaa ammoniakkin höyrystymislämmön ( $\Phi_l$ ).

Nestemäiseksi muuttunut ammoniakki virtaa paisuntaventtiilin läpi. Paine laskeaan höyrystimen (C) paineeseen, jolloin ammoniakki höyrystyy sitoen höyrystymislämmön ( $\Phi_h$ ) itseensä lämmönlähteenä toimivasta ympäristöstä. Tässä tapauksessa ympäristönä voisi olla voimalaitoksen jäähdytysvesi. Höyrystynyt ammoniakki johdetaan imeyttimeen (D), johon syötetään keittimestä laimeaa nestemäistä vesiammoniakkiseosta. Ammoniakki liukenee eli absorboituu väkeväksi liuokseksi samalla luovuttaen liukenemislämmön ( $\Phi_a$ ), joka johdetaan käyttökohteeseen. Väkevä liuos pumpataan takaisin kiertoon ja keittimeen ja prosessi alkaa alusta. (10, s. 92.)



KUVA 5. Ammoniakki/vesi-absorptiokoneiston virtauspiirros (10, s. 93)

### 3.5.2 Jäähdytysveden hyödyntäminen absorptiopumpulla

Kompressorilämpöpumppeihin verrattuna absorptiolämpöpumpun etuihin luetaan liikkuvien osien puuttuminen, lukuun ottamatta liuospumppua. Tästä syystä absorptiolämpöpumpun huolto- ja kunnossapitotarve on vähäinen. Hyvänä puolenä voidaan pitää myös absorptiolämpöpumpun vähäistä melutasoa verrattuna kompressorilämpöpumppeihin. (17, s. 30.)

Absorptioprosessissa lämmönlähteen lämpötila vaikuttaa COP-lukuun vähemmän kuin kompressoriprosessissa. Tästä syystä se soveltuu paremmin matalalämpöisen lämmönlähteen hyödyntämiseen. Huonona puolena on toisaalta se, että korkeita lämpötiloja tuottaessa COP-luku laskee suhteessa enemmän, minkä takia se sopiikin paremmin matalalämmön tuottamiseen. (17, s. 33.)

Jäähdytysveden ollessa kuitenkin kohtuullisen lämmintä on järkevämpää käyttää kompressorilämpöpumppua, jolla voidaan saavuttaa parempi lämpösuhde korkeita lämpötiloja tuottaessa. Absorptiolämpöpumpun hankintahinta on myös korkeampi kuin vastaavan tehoisen kompressorilämpöpumpun (17, s. 30), joka

myös vaikuttaa lämpöpumpun valintaan. Mainittujen ominaisuuksien takia tässä työssä on päädytty suunnittelemaan lämpöpumppausta absorptiolämpöpumpujen sijaan kompressorilämpöpumpulla, koska se soveltuu ominaisuuksiensa puolesta paremmin jäähdytysveden lämpöenergian hyödyntämiseen.



## 4 LÄMMÖN KÄYTTÖKOHTEIDEN KARTOITUS

### Ideota mahdollisiksi käyttökohteiksi laitosalueella

Lämmön käyttäminen mahdollisimman lähellä lämmönlähdettä on todettu parhaimmaksi ratkaisuksi, sillä lämmönsiirtämisessä syntyy aina häviöitä ja pumpaamisesta kustannuksia. Myös rakennuskustannukset kasvavat sen mukaan mitä kauemmaksi lämpöä halutaan siirtää.

Seuraavat mahdolliset käyttökohteet sijoittuvat laitoksen välittömään yhteyteen:

- laitoksen kiinteistöjen lämmitys
- pihojen sulanapito talvella
- jäähdytysveden ottokanavan sulatus
- OTEC.

### Ideota lämmön käyttökohteiksi laitosalueen ulkopuolella

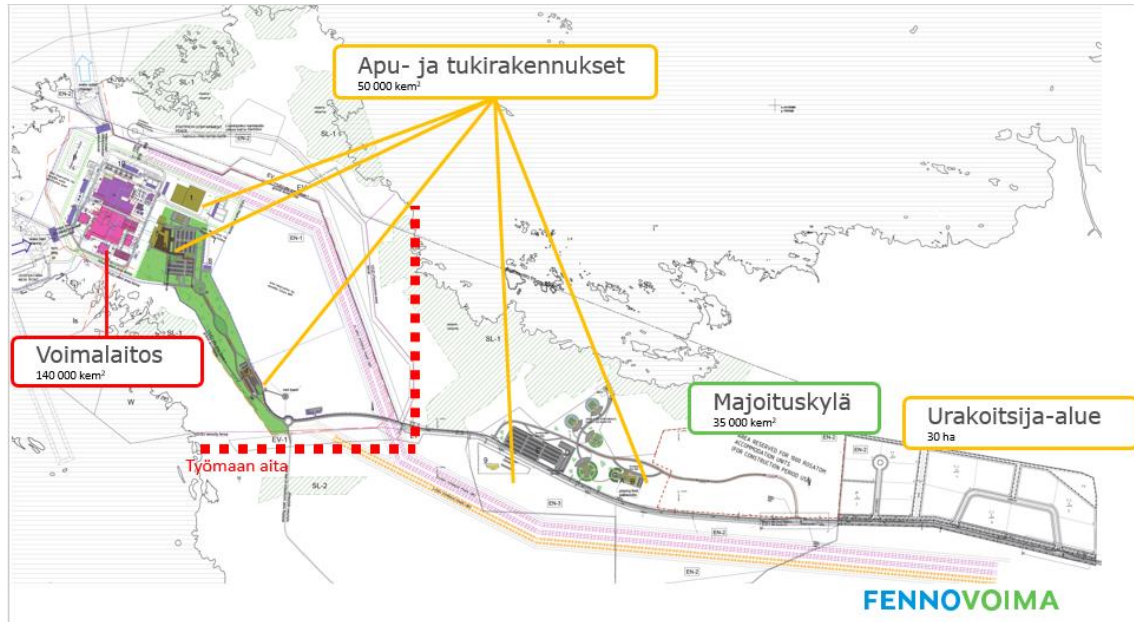
Ydinvoimalaitoksen ympärillä on turva-alue, joka ulottuu viiden kilometrin säteelle. Tämän turva-alueen sisäpuolelle ei saa rakentaa pysyviä asumuksia tai paikkoja, joissa oleskelee jatkuvasti ihmisiä. (1, s. 91). Sen vuoksi mietitään seuraavia käyttökohteita, joissa lämpöä voitaisiin hyödyntää laitosalueen ulkopuolella:

- asuntojen tai julkisten rakennusten lämmitys
- kasvihuoneen lämmitys
- biopolttoaineen kuivaimen lämmitys
- biokaasuprosessin lämmitys
- urheilupuiston lämmitys.

#### 4.1 Laitoksen kiinteistöjen lämmitys

Hanhikiven ydinvoimalan alueella tulee sijoittumaan paljon erilaisia toimintaa tukevia rakennuksia, jotka tarvitsevat lämmitystä. Osa laitoksen rakennusten lämmitystarpeesta voidaan tuottaa turbiinilta otettavalla höyryllä. (1, s. 57). Laitoksen pysyvien rakennusten kerrospinta-ala tulee koostumaan voimalaitoksesta 140 000 m<sup>2</sup>, apu- ja tukirakennuksista 26 500 m<sup>2</sup> sekä majoituskylästä 35 000

m<sup>2</sup> (kuva 6) (18). Jos oletetaan, että voimalaitosrakennuksen lämmitys tapahtuu omatuotannolla, lämmitettävää kerrospinta-alaa on 61 500 m<sup>2</sup>. Käyttöveden kulutukseksi laitoksen käytön aikana arvioidaan noin 150 m<sup>3</sup> vuorokaudessa (1, s. 57).



KUVA 6. Laitosalueen layout-suunnitelma (19)

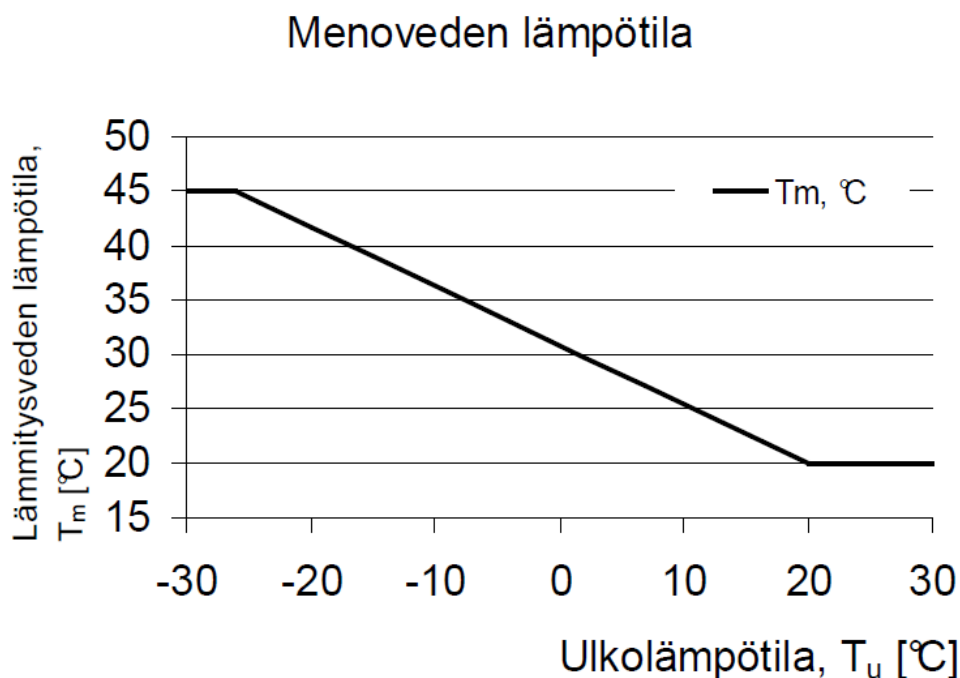
Mahdollinen lämmitysjärjestelmä toteutettaisiin suoraan lämpöpumpulla ja lämmönjakokeskuksena toimisi lämpöpumppu itsessään. Lämmitysjärjestelmän lämmönsiirtoneste lämmitetään siis suoraan lämpöpumpussa ilman erillistä lämmönvaihdingia. Lämpöpumpun lauhdutuslämpötila suunnitellaan rakennukseen tulevan lämmitysjärjestelmän vaatimien lämpötilojen mukaisesti. Järjestelmää suunniteltaessa on huomioitava, että lauhdutuslämpötila on suunniteltava korkeammaksi kuin sillä tuotetun lämmitysveden lämpötila, koska sitä enemmän lämmön siirtyminen hidastuu mitä pienemmäksi lämpötilojen välinen ero muodostuu.

Uudisrakennuksien radiaattoriverkoston mitoituslämpötilat ovat tavallisesti menovedelle +45 °C ja paluuvvedelle +30 °C (14, s. 44). Poikkeustapauksissa, jos esimerkiksi pattereiden kokoa joudutaan rajoittamaan, voidaan menolämpötiloja käyttää välillä +45...+60 °C (20, s. 80).

Radiaattorilämmityksen lisäksi vaihtoehtona on toteuttaa lämmitys lattialämmityksenä, jossa menoveden maksimaalinen lämpötila on 40 °C ja paluuveden 30 °C (14, s. 36). Tavallisesti käytetään yhdistettyä lämmitysjärjestelmää, jossa osa tiloista on toteutettu lattialämmityksellä ja osa radiaattoreilla. On kuitenkin huomioitava, että lattialämmityksen rakennuskustannukset ovat huomattavasti suuremmat kuin radiaattorilämmityksessä. Sen vuoksi tässä työssä keskitytään pelkästään radiaattorilämmitteiseen vaihtoehtoon.

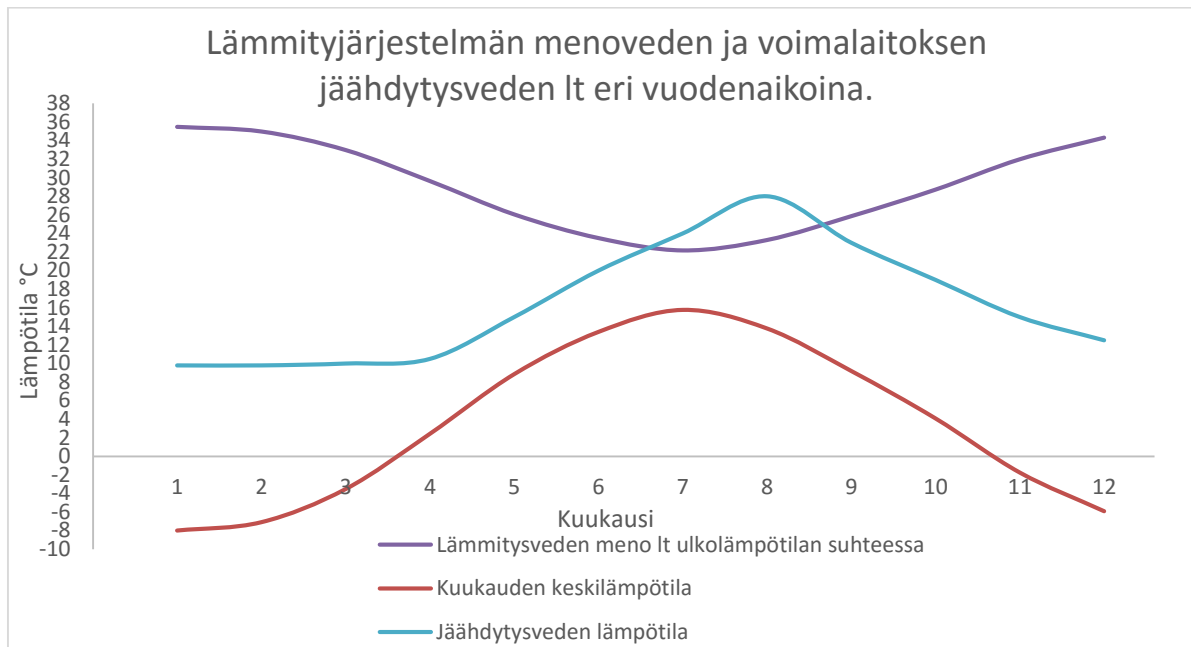
Käyttöveden lämmityksen mitoituslämpötilana käytetään +60 °C:ta (14, s. 11). Käyttöveden korkeamman lämpötilan tuottaminen lämpöpumpulla ei välttämättä ole kannattavaa, sillä se huonontaa lämpöpumpun COP-lukua. Vaihtoehtoisesti käyttöveden lämmönkorotus voidaan toteuttaa esimerkiksi lämminvesivaraajassa suoralla sähkölämmityksellä.

Lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan (kuva 7). Lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila on siis suoraan riippuvainen ulkolämpötilasta. Näin ollen tuotettavan lämmitysveden lämpötilaa voidaan arvioida ulkolämpötilojen mukaisesti.



KUVA 7. Menoveden lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta 45/30 lämmitysjärjestelmässä (14, s. 44)

Kun kuukausittaiset lämpötilat tiedetään mitoitusvuoden 2012 perusteella (21, s. 31), voidaan siitä luoda kuvaaja. Kuvaajasta saadaan käsitys voimalaitoksen jäähdytysveden ja lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilaerosta (kuva 8), minkä perusteella voidaan arvioida saatavaa COP-lukua.



*KUVA 8. Lämmitysjärjestelmän, jäähdytysveden ja kuukauden keskilämpötilat (1, s. 125)(21, s. 31)*

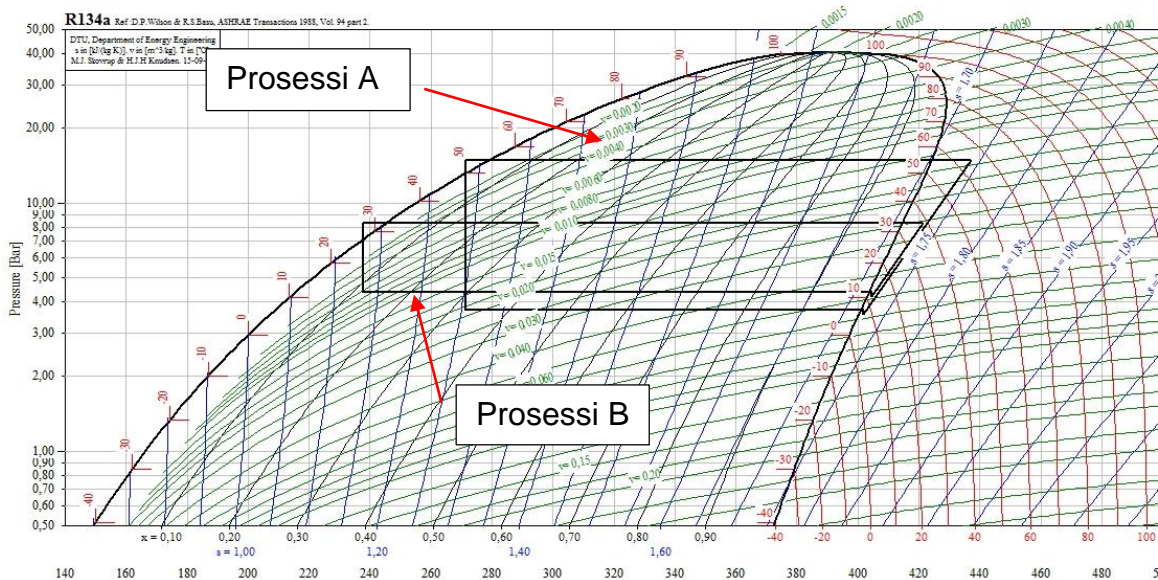
Lämmityskauden rajalämpötila on ulkolämpötila, jonka alle laskiessa rakennuksia aletaan lämmittää. Suomessa tämä rajalämpötila on yleensä +12–15 °C (14, s. 17). Lämpöpumpun tehonmitoituspisteenä käytetään ulkolämpötilaa, jossa lämmitystarve voidaan tuottaa kokonaan lämpöpumpulla. Tässä tapauksessa tehonmitoituspisteenä pidetään –32 °C:n ulkolämpötilaa, joka on säävyöhykealueen 3 ulkolämpötilan mitoituslämpötila (21, s. 29).

Kun tiedetään, että ulkolämpötila laskee –32 °C:seen tyypillisesti vain joului-, tammi- tai helmikuussa, voidaan kuvan 8 perusteella arvioida, että hyödynnettävän jäähdytysveden lämpötila vaihtelee tänä aikana +10 °C...+12 °C:n välillä. Seuraavassa esimerkissä käytetään jäähdytysveden lämpötilana +10 °C:ta. Mikäli lämmitettävä kohde käyttää kuvan 8 mukaista säätökäyrää radiaattori lämmityksessä, menoveden lämpötilaksi saadaan tällöin +45 °C.

Lämpöpumpun COP-luvun laskeminen toteutetaan Coolpack-ohjelmalla laske-  
malla ja siinä käytettävät vakiot ovat seuraavat:

- lauhduttimen asteisuus 10 k
- höyrystimen asteisuus 2,5 k
- lauhteen alijäähdytys 5 k
- tulistus 1 k
- painehäviöt imu- ja paineputkissa lämpöhäviöksi muunnettuina 1k per puoli.

Kuvassa 9 on piirretty lämpöpumpppu-prosessi mitoitus- ja rajalämpötiloissa, josta saadaan laskettua lauhduttimen lämpöteho  $Q_{out}$  ja kompressorin teho  $W_c$ .



KUVA 9. Lämpöpumpppu-prosessi p-h-diagrammissa mitoitus- ja rajalämpötilassa

Kaavalla 2 saadaan Coolpack-ohjelman avulla esimerkiksi 1 MW:n laitteessa

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_c} = \frac{1MW}{0,2289MW} = 4,4.$$

COP-luvuksi saadaan 4,4, jolloin jokaista lämpöpumpun kuluttamaa megawattia kohden sähköä saadaan 4,4 megawattia lämpöä. Tehomitoituspisteen lämpöpumpppu-prosessi A on kuvattuna p-h-diagrammissa (kuva 9).

Lasketaan toinen esimerkki tilanne kun ulkolämpötila on lämmitysjärjestelmän rajalämpötilassa +15 °C, lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila on silloin kuvan 7 perusteella noin 22,5 °C. Lämpöpumpun hyödyntämäksi jäähdytysveden lämpötilaksi otetaan +15 °C, joka vastaa kuvan 4 perusteella toukokuun olosuhteita. Kaavalla 2 ja Coolpack ohjelmalla lasketaan saavutettava COP-luku

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_c} = \frac{1MW}{0,09919MW} = 10,1.$$

Näin ollen COP-luvuksi saadaan siis noin 10, jota voidaan pitää todella hyvänä COP-lukuna. Kesällä COP-luku voi nousta entisestään, kun jäähdytysveden lämpötila nousee meriveden mukaan. Rajalämpötilan lämpöpumppuprosessi B on kuvattuna p-h-diagrammissa (kuva 9).

Esimerkkitilanteissa saatujen tietojen perusteella voidaan arvioida rakennusten lämmitykseen käytettävän lämpöpumppauksen olevan mahdollinen vaihtoehto jäähdytysveden hyödyntämiseen, minkä takia sitä kannattaa tutkia lisää.

#### **4.1.1 Lämpöpumppauspotentiaali**

Pyhäjoki sijaitsee Suomen neljään osaan jaetulla säävyöhykekartalla alueella 3, käytettäessä nykyistä ilmastoa kuvaavan testivuoden 2012 kuukausittaisia keskilämpötiloja (taulukko 1). Kuukausien keskilämpötilojen perusteella voidaan arvioida lämmitysjärjestelmän menoveden keskimääräiset lämpötilat kuvan 7 perusteella, jotta voidaan arvioida eri kuukausina saavutettavaa lämpöpumpun hyötysuhdetta.

TAULUKKO 1. Kuukausittaiset keskilämpötilat (21, s. 31)

Kuukausi	Keskilämpötila °C
Tammi	-8
Helmi	-7,1
Maalis	-3,53
Huhti	2,42
Touko	8,84
Kesä	13,39
Heinä	15,76
Elo	13,76
Syys	9,18
Loka	4,07
Marras	-1,76
Joulu	-5,92
keskiarvo	3,43

Kuukauden keskilämpötilan perusteella ei saada kuitenkaan selville todellista lämmön tarvetta, sillä esimerkiksi kesäaikaan heinäkuussa lämpötila laskee vain hetkittäin lämmitysraja lämpötilan +15 °C:n alapuolelle. Kun taas esimerkiksi talviaikaan tammikuussa ulkolämpötilälämpötila pysyy hyvin suurella todennäköisyydellä jatkuvasti alle +15 °C:ssa, jolloin rakennusta täytyy lämmittää koko ajan. Siksi apuna käytetään lämmitystarvetta paremmin kuvaavaa lämmitystarvelukua, joka kertoo asetunteina vuosittaisen lämmitysenergiatarpeen ja kaantumisen kuukausien välillä. Pyhäjoelle lämmitystarveluvut voidaan laskea korjauskertoimen avulla Oulun vertailuarvosta (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Lämmitystarveluku Oulussa ja Pyhäjoella (22)

Lämmitystarveluvut (S17) kuukausittain Oulusta korjauskertoimella laskettuna Pyhäjoella ja prosentuaalinen lämpöenergiantarve eri kuukausien osalta													
	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu	Vuosi
Oulu	824	742	677	465	249	47	9	55	224	423	593	749	5057
Pyhäjoki	800	720	657	451	242	46	9	53	217	411	576	727	4910
%	16,3	14,7	13,4	9,2	4,9	0,9	0,2	1,1	4,4	8,4	11,7	14,8	100

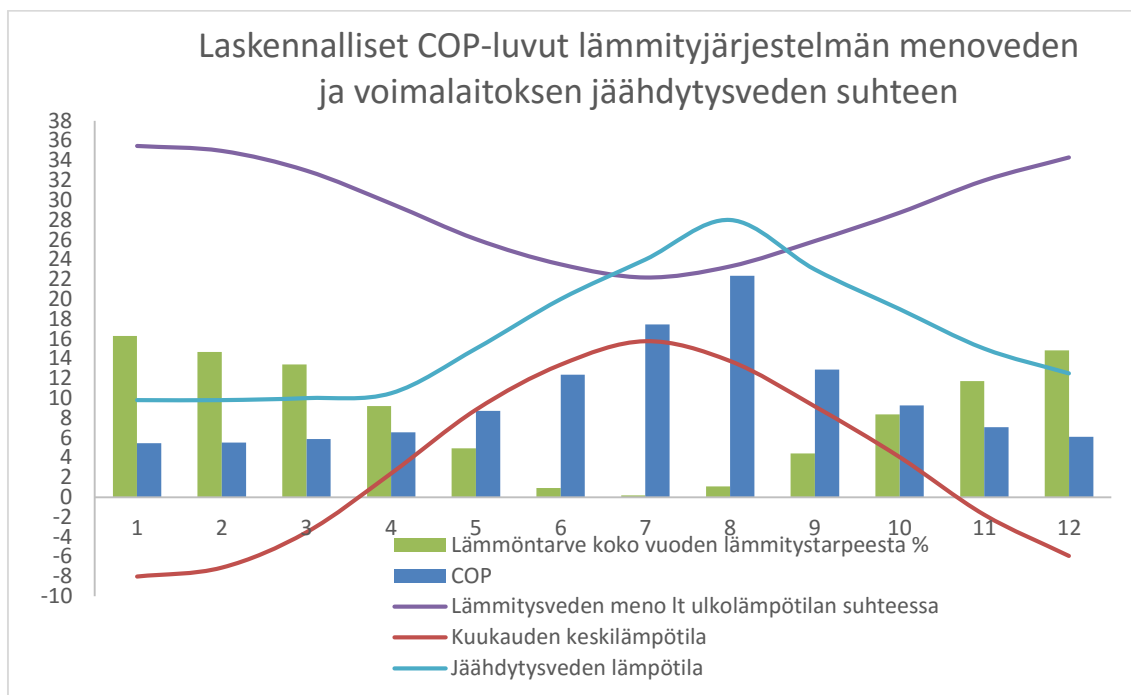
Lämpöpumpun COP-luvun kuukausikohtainen keskiarvo voidaan laskea Coolpack-ohjelmalla. Laskeminen voidaan suorittaa, kun tiedetään hyödynnettävän lämmönlähteen, eli tässä tapauksessa voimalaitoksen jäähdytysveden, lämpötila sekä tuotettavan lämmitysveden lämpötila, joka määritetään kuvan 7 perusteella (taulukko 3).

*TAULUKKO 3. Kuukausittaisen ulkolämpötilan vaikutus lämpöpumpun lämpösuhteeseen.*

Kuukausi	Ulkoilman keskilämpötila	Menoveden lämpötila °C	Jäähdytysveden lämpötila °C	COP
tammi	-8	35,48	9,8	5,46
helmi	-7,1	34,98	9,8	5,53
maalis	-3,53	32,98	10,0	5,87
huhti	2,42	29,64	10,5	6,56
touko	8,84	26,05	15,0	8,70
kesä	13,39	23,5	20,0	12,38
heinä	15,76	22,17	24,0	17,44
elo	13,76	23,29	28,0	22,35
syys	9,18	25,86	23,0	12,90
loka	4,07	28,72	19,0	9,25
marras	-1,76	31,99	15,0	7,06
joulu	-5,92	34,32	12,5	6,08

Arvioitaessa lämpöpumppauksen potentiaalia voidaan muodostaa kuvaaja, josta selviää eri kuukausien lämmöntarve sekä lämpöpumpun COP-luku vastaavana aikana (kuva 10). Lämmityskaudella marraskuusta maaliskuuhun on lämmitystarve suurimmillaan. Samaan aikaan on lämpöpumppauksen hyötysuhde matalimmillaan. Syksyllä, kun meriveden lämpötila on vielä kesän jälkeen korkea, lämpöpumppaus on kulutukseen suhteutettuna kaikkein hyödyllisintä. Kesällä sen sijaan lämmittäminen lämpöpumpulla on lämpösuhteen kannalta todella edullista, mutta lämmöntarpeen vähäisyyden takia sillä ei saavuteta yhtä suurta energian säästöä.





KUVA 10. Lämmitystarve ja lämpöpumpun COP-luku eri kuukausina.

Kuvaajan COP-luvut ovat suoraan verrannollisia lämmitysveden oletettuun lämmitysjärjestelmän menolämpötilaan, joka vaihtelee  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ...  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ : n välillä. Useimmat markkinoilla olevat lämpöpumput toimivat noin  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n vaihteluvälillä tuotetun lämpötilan osalta. Tämä rajoittaa osittain lämpöpumppausta käyttöveden ja lämmityksen toteutukseen samalla laitteistolla, sillä laitteiston kannalta voi olla ongelmallista tuottaa  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ...  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötiloja. Käyttöveden lämmitykseen tarvittaisiin mahdollisesti erillinen tulistin, jolla käyttöveden korkeampi lämpötila voitaisiin tuottaa.

Käyttöveden lämmitykseen kesä on edullisinta aikaa, jolloin lämpötilaero lämmönlähteen ja tuotetun lämmön välillä on pienimmillään. Talvella lämpötilaero käyttöveden ja lämmönlähteen välillä on sen sijaan korkeampi, mikä huonontaa lämpösuhdetta. Uusien rakennusten käyttöveden lämpötila tulisi olla vähintään  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja enintään  $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$  (23). Käyttöveden lämpötilaksi tässä tapauksessa oletetaan  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolla minimoidaan legionellabakteerin lisääntymismahdollisuus. Korkeammalla käyttöveden lämpötilalla varmistetaan myös yli  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n

pysyvyys suuren rakennuksen pitkistä siirtomatkoista huolimatta. (23.) Jäähdytysveden kuukausittaisten lämpötilojen perusteella on Coolpack-ohjelman avulla laskettu lämpöpumpun COP-luku käyttöveden lämmitykselle (Taulukko 4).

*TAULUKKO 4. Lämpöpumpun COP-luku kuukausittaisten jäähdytysveden lämpötilojen perusteella tuotettaessa +60-celsiusasteista käyttövettä*

Kuukausi	Jäähdytysveden lämpötila	COP
	kuukausittain °C	
Tammi	9,8	3,2
Helmi	9,8	3,2
Maalis	10,0	3,2
Huhti	10,5	3,2
Touko	15,0	3,5
Kesä	20,0	3,9
Heinä	24,0	4,3
Elo	28,0	4,7
Syys	23,0	4,2
Loka	19,0	3,8
Marras	15,0	3,5
Joulu	12,5	3,4

#### 4.1.2 Lämmitysenergiantarve laitoksen kiinteistöissä

Suunnitellessa rakennusten lämmitystä lämpöpumppauksella täytyy arvioida lämmitysenergian tarvetta. Olemassa olevien rakennusten ominaislämpötehon

ja lämpöindeksin avulla voidaan arvioida mitä suuruusluokkaa tulevien rakennusten lämpöenergian tarve on (taulukko 5).

*TAULUKKO 5. Olemassa olevien rakennusten ominaislämpöteho ja lämpöindeksi Oulussa (20, s. 20)*

Rakennustyyppi	Ominaislämpöteho (W/m <sup>3</sup> )		Lämpöindeksi (kWh/m <sup>3</sup> ,v)		HUOM!
	Vanhat	Uudet	Vanhat	Uudet	
Pientalo	25 – 34	20 – 22	62 – 78	45 – 56	Uudet kiinteistöt vastaavat 1980 – 1990 lukujen rakennuksia
Kerrostalo	25 – 31	17 – 22	62 – 84	50 – 62	
Liikerakennus	22 – 38	22 – 34	50 – 90	38 – 50	2000 -luvun rakennukset on laskettava uusien määräysten mukaan
Julkinen rakennus	31 – 43	28 – 36	56 – 90	39 – 50	
Teollisuusrakennus	28 – 39	17 – 28	56 – 78	34 – 62	

On kuitenkin huomioitava, että taulukossa 5 ”uudet” tarkoittavat 80–90-lukujen rakennuksia, joiden energiatehokkuuteen verrattuna uudet rakennukset tulevat olemaan huomattavasti parempia. EU:n yhteinen tavoite on parantaa energiatehokkuutta 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä, joten energiankulutusta arvioidaan vähentämällä 20 % taulukon arvoista (24). Taulukon 5 perusteella voidaan arvioida lämmitysenergian kulutusta kun tiedetään rakennuksen käyttötarkoitus. Rakennusten lämmitetty tilavuus on laskettu huonekorkeudella 2,5 m. Arvioitu kulutus on laskettu eri käyttötarkoituksiin tulevista rakennuksista, luokitellen ne kolmeen eri luokkaan lämmitysenergian kulutuksen perusteella. (taulukko 6)

*TAULUKKO 6. Lämmitysenergian arvioitu vuotuinen kulutus eri rakennustyypeissä*

Luokka	1	2	3	
Rakennuksen käyttötarkoitus	Koulutuskeskus, porttirakennus, vierailukeskus, hallintorakennus	Varastot, huoltorakennus, laitostoimisto, paloasema	Majoituskylä	yht.
Rakennusten tilavuus m <sup>3</sup>	16250	50000	87500	153750
Arvioitu lämmitysenergian kulutus kWh/m <sup>3</sup> /a	30,4	27,2	40	
lämmitysenergian kulutus vuodessa kWh/a	494000	1360000	3500000	5354000

Yhteenlasketuksi vuotuiseksi lämpöenergian tarpeeksi saadaan siis noin 5 354 MWh vuodessa, mikäli uusista rakennuksista tulisi energiatehokkuudeltaan vanhempien rakennusten kaltaisia.

### Matala- ja passiivirakennukset

Toinen tapa määrittää on käyttää matala- ja passiivirakennuksien energiankulutusta. Matala- ja passiivirakennukset ovat nykyaikaisten rakennusmääräysten mukaisia rakennuksia energiatehokkaampia, joissa energiankulutuksen minimointi on tärkeä osa suunnittelua. Uusien ohjeiden mukaisesti matalaenergiatalossa saivat laskennallisten lämpöhäviöt olla maksissaan 85 % vertailulämpöhäviöistä. Passiivierakennuksessa ei määritelmän mukaan tarvita lainkaan lämmitysenergiaa, mutta käytännössä Suomen ilmastossa ei päästä nollokulutukseen kustannustehokkaasti. (25.) Lämmitysenergian tarve matala- ja passiivirakennuksissa on arvioitu taulukon 7 perusteella (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Matala- ja passiivirakennuksen lämmitysenergian tarve (26, s. 11)

Arvot		Matalaenergiatalo (M)	Passiivitalo (P)
<b>Uudisrakennuksen luokitteluarvot</b>			
1	Tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen nettoenergian ominaistarve	33 – 63 kWh/(m <sup>2</sup> a)	20 – 33 kWh/(m <sup>2</sup> a)
2	Tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergian ominaiskulutus	33 – 63 kWh/(m <sup>2</sup> a)	20 – 33 kWh/(m <sup>2</sup> a)
<b>Uudisrakennusten energiantarpeen ja kulutuksen ohjearvoja</b>			
3	Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian ominaistarve	20 – 25 kWh/(m <sup>2</sup> a)	20 – 25 kWh/(m <sup>2</sup> a)
4	Rakennuksen lämmitysjärjestelmän ominaiskulutus	55 – 93 kWh/(m <sup>2</sup> a)	40 – 59 kWh/(m <sup>2</sup> a)
5	Kiinteistön- ja kotitaloussähkön ominaiskulutus	30 – 35 kWh/(m <sup>2</sup> a)	25 – 35 kWh/(m <sup>2</sup> a)
6	Kiinteistön kokonaisenergian ominaiskulutus	85 – 128 kWh/(m <sup>2</sup> a)	65 – 94 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Käytetään suunnitteluarvoina sarakkeen 4 arvoja, joka on rakennuksen lämmitysjärjestelmän ominaiskulutuksen suurpiirteinen vaihteluväli. Energiakulutuk-

sen voidaan olettaa olevan uusissa rakennuksissa vähintään matalaenergiatason tasoa eli noin 60 kWh/m<sup>2</sup>. Mikäli rakennukset kuitenkin tehdään passiivirakennuksen vaatimukset täyttäen, tulee kulutus olemaan noin 45 kWh/m<sup>2</sup>.

Lämmitysenergian kulutus vuodessa saadaan kertomalla yhden neliömetrin kulutus rakennusten pinta-alalla 61 500 m<sup>2</sup>. Kulutukseksi saadaan tällöin matalaenergia rakennuksissa 3 690 MWh ja passiivirakentamisella noin 2 768 MWh. Eri tavoin laskettujen lämmitysenergian kulutuksen arviot eroavat huomattavasti toisistaan eikä näin ollen ei voida sanoa mikä on lähimpänä todellista tilannetta. koska ei ole tiedossa tulevien rakennusten energiatehokkuus tietoja. Tästä syystä lasketaan lämpöpumppauksen kannattavuus kaikkien kolmen energiakulutus arvion mukaan.

#### 4.1.3 Lämmitystehontarve

Rakennuksen tehonmitoituspiste on ulkolämpötila, johon saakka lämmitysjärjestelmä kykenee tuottamaan tarvittun lämmitystehon (14, s.18). Tehonmitoituspisteenä käytetään säävyöhykealueella 3 mitoittavana ulkolämpötilana – 32 °C (21, s. 29). Laitosalueen rakennuksien mitoitustehon laskennassa käytetään kaavaa 3 (27, s. 92).

$$P_{kok} = P_n \times A_{kok}$$

KAAVA 3

$P_{kok}$  = tarvittava lämmitysteho (W)

$A_{kok}$  = lämmitettävä pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$P_n$  = tarvittava lämmitysteho neliömetriä kohden

Olemassa olevien rakennuksiin verrattavien rakennusten tehontarvetta voidaan arvioida taulukon 5 perusteella. Kaavalla 3 laskettuna saadaan mitoittavan lämmitystehon tarpeeksi noin 2 156 kW (taulukko 8).

TAULUKKO 8. Lämmitystehon tarve olemassa olevien rakennusten kaltaisissa kiinteistöissä

Luokka	1	2	3	
Rakennuksen käyttötarkoitus	Koulutuskeskus, porttirakennus, vierailukeskus, hallintorakennus	Varastot, huoltorakennus, laitostoimisto, paloasema	Majoituskylä	yht.
Rakennusten tilavuus m <sup>3</sup>	16250	50000	87500	153750
Lämmitysteho W/m <sup>3</sup>	17,6	13,6	13,6	
Vaadittu Lämmitysteho kW	286	680	1190	2156

### Matala- ja passiivirakennuksen lämmitystehontarve

Toinen vaihtoehto on käyttää matala- ja passiivien energiarakennusten lämmitystehontarvetta kerrostalojen osalta (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Matala- ja passiivirakennusten tehon tarve (26, s. 12)

Arvot	Matalaenergiatalo (M)	Passiivitalo (P)
<b>Kerrostalo</b>		
Tavallinen talvikäyttö	15–20 W/m <sup>2</sup>	10–15 W/m <sup>2</sup>
Mitoitustilanteen huipputeho	30 W/m <sup>2</sup>	20 W/m <sup>2</sup>
<b>Pientalo</b>		
Tavallinen talvikäyttö	20–30 W/m <sup>2</sup>	10–20 W/m <sup>2</sup>
Mitoitustilanteen huipputeho	40 W/m <sup>2</sup>	25 W/m <sup>2</sup>

Matalaenergia rakennuksessa lämmitystehon huippukäyttö tilanteen ohjearvona voidaan pitää 30 W/m<sup>2</sup>, tavallisessa talviajan käytössä tarve on noin 15–20 W/m<sup>2</sup>. Tässä tapauksessa käytetään kokonaistehon laskennassa huippuarvoa 30 W/m<sup>2</sup>, koska tuleville rakennuksille ei ole määritetty tarkempia arvoja. Passiivirakennuksissa huipputehona pidetään 20 W/m<sup>2</sup> ja normaalin talviajan tehona 10–15 W/m<sup>2</sup>. Myös passiivirakennuksen tapauksessa käytetään mitoituskeuhon huipputehon tarvetta 20 W/m<sup>2</sup>. (26, s.12.)

Laskemalla kaavalla 3 matalaenergiarakennuksen tehontarpeella 30 W/m<sup>2</sup> ja lämmitettävien rakennusten pinta-alalla 61 500 m<sup>2</sup>, saadaan lämmitystehontarpeeksi 1 850 kW. Käytettäessä passiivirakennuksen tehontarvetta 20 W/m<sup>2</sup> saadaan lämpötehontarpeeksi 1 230 kW.

Lasketut arvot kuvaavat vain huipputehon tarvetta, mutta normaalitilanteissa tehontarve on huomattavasti pienempi. Huipputehontarve on kuitenkin otettava

huomioon kun suunnitellaan lämmitysjärjestelmää, sillä järjestelmän on kyettävä tuottamaan tarvittu lämmitysteho kaikissa tilanteissa. Lämmitystehon tarpeen arviointi antaa lämpöenergian tarpeen ohella eri suurusluokan tehontarpeita, joten lämpöpumpun tehon määrittämisessä käytetään kaikkia saatuja arvoja (taulukko 10).

*TAULUKKO 10. Eri energiatehokkaiden rakennusten lämmitysjärjestelmän mitoitus- ja lämpöenergian kulutus*

	Mitoitus- teho kW	Vuotuinen lämpöenergian kulutus MWh
<b>Olemassa olevat</b>	2156	5354
<b>Matalaenergia</b>	1850	3690
<b>Passiivi</b>	1230	2768

#### 4.1.4 Käyttöveden lämmitys

Käyttöveden lämmityksen kuluttama energian määrä ei juurikaan riipu ulkolämpötilasta, joten se erotetaan muusta lämmitysenergiankulutuksesta. Käyttöveden energiankulutus saadaan normaalisti käyttöveden energiamittauksesta. Tilanteissa, jossa tiedetään vain käytetyn talousveden määrä, voidaan lämmitetyn veden osuuden olettaa olevan asuinrakennuksissa noin 40 % ja muissa rakennuksissa noin 30 % kokonaismäärästä. (23.)

Käytettävän talousveden kulutukseksi laitosalueella on arvioitu 150 m<sup>3</sup> vuorokaudessa, laitoksen käydessä normaalisti (1, s. 67). Mikäli lämmitetyn veden osuudeksi kokonaisuudesta arvioidaan vajaa kolmannes, on kulutus tällöin noin 45 m<sup>3</sup> vuorokaudessa, mikä vastaa noin 16 425 m<sup>3</sup>:a vuodessa. Arvioidaan määrän todenmukaisuutta jakamalla kulutus rakennetulla pinta-alalla:

$$\frac{16425 \text{ m}^3/\text{a}}{201500 \text{ m}^2} \times 1000 = 81,5 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{a}.$$

Kulutukseksi saadaan siis 81,5 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/a, jota voidaan verrata taulukoituuihin arvioihin eri rakennustyyppien osuudessa (taulukko 11).

TAULUKKO 11. Lämpimän käyttöveden kulutuksen oletusarvoja (23)

Rakennustyyppi	Lämpimän veden kulutus rakennuksen bruttoalaa kohti, $V_{\text{kv,omin}}$ ( $\text{dm}^3/\text{brm}^2/\text{vuosi}$ )
Toimistorakennus	100
Terveystieteiden tutkimuskeskus	520
Päiväkoti	460
Teatteri ja kirjasto	120
Uimahalli	1 800
Opetusrakennus	180
Myymälä	65
Muut rakennukset	100

Kun tiedetään arvio lämmitetyn käyttöveden kulutuksesta, lasketaan siihen kuuluva lämmitysenergia kaavalla 4 (23). Laskentaan tarvitaan lämmitettävän kylmän veden lämpötila ( $t_1$ ) ja lämmitetyn veden lämpötila ( $t_2$ ), jotka tässä tapauksessa ovat kylmälle  $+5\text{ }^\circ\text{C}$  ja lämmitetylle  $+60\text{ }^\circ\text{C}$ .

$$Q = \frac{\rho \times c_p \times V \times (t_2 - t_1)}{3600}$$

KAAVA 4

$Q$  = lämmitysenergia (kWh)

$\rho$  = veden tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_p$  = veden ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ}/\text{kg K}$ )

$V$  = veden tilavuus ( $\text{m}^3$ )

$t_2$  = lämmitetyn veden loppulämpötila ( $^\circ\text{C}$ )

$t_1$  = lämmitettävän veden alkulämpötila ( $^\circ\text{C}$ )

Sijoittamalla kaavaan vuosittainen vedenkulutus neliometriä kohden saadaan:

$$\frac{\frac{1000\text{ kg}}{\text{m}^3} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,0815\text{ m}^3 \times (60^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C})}{3600} = 5,23\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{a}.$$

Kertomalla rakennusten pinta-alalla, saadaan käyttöveden lämmitysenergian kulutus eri rakennuksille (taulukko 12).



TAULUKKO 12. Käyttöveden lämmitysenergian kulutus vuodessa

Rakennus	Pinta-ala m <sup>2</sup>	LKV-energian-tarve kWh/a
Apu- ja tukira-kennukset	26 500	138 584
Majoituskylä	35 000	183 036
yht.	61 500	321 620

Käyttöveden lämmitystehontarve voidaan laskea kaavalla 5 (28, s. 64–65). Las-  
kettaessa on kuitenkin tehtävä oletus, että lämmin vesi tuotetaan varaajaan,  
koska lämmitystehontarve vaihtelee huomattavasti hetkittäisen kulutuksen mu-  
kaan. Mitoitusvirtaamana pidetään 85 dm<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup>/a, jotta varmistutaan lämmityste-  
hon riittävydestä. Kiertohäviöt, eli lämpöhäviöt veden kiertäessä putkistoissa  
määritellään rakennuksen lattiapinta-alan mukaan, ollen tavallisesti noin 0,002  
kW/m<sup>2</sup> (28, s. 64).

$$\Phi_{lkv} = \rho \times c_{pv} \times q_v \times (t_2 - t_1) + \Phi_{lkv,kiertohäviö}$$

KAAVA 5

$\Phi_{lkv}$  = lämmitystehontarve (W)

$\rho$  = veden tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg K)

$q_v$  = lämmitetyn veden mitoitusvirtaama (m<sup>3</sup>/s)

$t_2$  = lämmitetyn veden loppulämpötila (°C)

$t_1$  = lämmitettävän veden alkulämpötila (°C)

$\Phi_{lkv, kiertohäviö}$  = Putkistosta johtuva kiertohäviö kW/m<sup>2</sup>

$$\frac{1000kg}{m^3} \times \frac{4,2kJ}{kg} \times 61500m^2 \times \frac{0,085m^3}{31536000s} \times (60^\circ C - 5^\circ C) + 0,002kW \\ \times 61500m^2 = 161kW$$

Lämpimän käyttöveden lämmitystehontarpeeksi saadaan näin ollen 161 kW.

#### 4.1.5 Lämpöpumppauksen kannattavuuden arviointi

Ydinvoimalan itse tuottaessa valtavat määrät sähköä on sitä saatavilla omakus-  
tanne hintaan myös lämmitykseen, joka tarkoittaa markkinahintoja matalampaa

hintaa. Toisaalta omakäyttöön menevä sähkö on pois myydyistä sähköenergiasta ja näin ollen kustannuksia syntyy väistämättä. Sähkön hinnan voi arvioida olevan noin 50 €/MWh Fennovoiman omalle käytölle (29). Yksi mahdollinen vaihtoehto lämmityksen toteutukseen on myös lämmön ottaminen höyrynä suoraan turbiinin välittömästi. Se vaatisi kuitenkin muutoksia prosessiin ja vähentäisi turbiinilta saatavaa tehoa, joten tätä vaihtoehtoa ei käsitellä tässä työssä.

Lasketaan suoralla sähkölämmityksellä toteutetun lämmityksen kustannukset Apu- ja tukirakennuksissa sekä majoituskylässä, jonka lämmitystarpeet on arvioitu luvussa 4.1.4 (taulukko 10). Lämpimän käyttöveden energiankulutus luvussa 4.1.4 (taulukko 12). Suoralla sähkölämmityksellä toteutetun lämmitysjärjestelmän hyötysuhteen voidaan olettaa tässä tilanteessa olevan 100 %, jonka takia lämmitysenergian kulutus vastaa lämmitykseen käytettävän sähköenergian tarvetta (taulukko 13).

*TAULUKKO 13. Lämpöenergian tarve ja hinta suoralla sähköllä lämmittäessä*

Rakennuksen energiatehokkuus	Vuotuinen lämpöenergian kulutus MWh	Sähköenergian hinta €
Olemassa olevat	5 354	267 700
Matalaenergia	3 690	184 500
Passiivi	2 768	138 400
LKV	322	16 100

Lämmitystarvelukujen perusteella on laskettu jokaisen kuukauden prosentuaalinen osuus lämmitystarpeesta eri energiatehokkuuden mukaisilla arvoilla lasketuissa rakennuksissa (taulukko 14).

TAULUKKO 14. Lämmitystarve kuukausittain

Lämmitysenergian kulutus MWh				
Kuukausi	lämmitystarve %	Olemassa olevat	Matalaenergia	Passiivi
tammi	16,3	873	601	451
helmi	14,7	787	542	407
maalis	13,4	717	494	371
huhti	9,2	493	339	255
touko	4,9	262	181	136
kesä	0,9	48	33	25
heinä	0,2	11	7	6
elo	1,1	59	41	30
syys	4,4	236	162	122
loka	8,4	450	310	233
marras	11,7	626	432	324
joulu	14,8	792	546	410
<b>Yhteensä</b>	100	5354	3690	2768

Kun tiedetään lämmitysenergian tarpeet kuukausittain, voidaan laskea arvio lämpöpumpulla toteutetusta lämmityksestä, jossa on hyödynnetty keskimääräisiä kuukausittaisia COP-lukuja. Laskettujen COP-lukujen avulla saadaan laskettua lämpöpumpun sähkönenergiankulutus tuotettua lämpöenergiaa kohden. Lisäksi tiedettäessä sähkönenergian hinta, suoralla sähkölämmityksellä ja lämpöpumpauksella tuotetun lämmön välinen hintaero voidaan laskea (taulukko 15).

TAULUKKO 15. Lämpöpumpun kuluttama sähköenergia kuukausittaisen COP-luvun mukaan

Kuukausi	Lämpöpumpun kuluttama sähköenergia MWh				Säästetty sähköenergia %
	COP kuukauden keskimääräisen menoveden lämpötilan mukaan	olemassa olevat	matalaenergia	passiivi	
tammi	5,5	160	110	83	82
helmi	5,5	142	98	74	82
maalis	5,9	122	84	63	83
huhti	6,6	75	52	39	85
touko	8,7	30	21	16	89
kesä	12,4	4	3	2	92
heinä	17,4	1	0,4	0,3	94
elo	22,3	3	2	1	96
syys	12,9	18	13	9	92
loka	9,3	49	34	25	89
marras	7,1	89	61	46	86
joulu	6,1	130	90	67	84
<b>Yhteensä</b>		823	567	425	85

Vertailemalla suoralla sähkölämmityksellä ja lämpöpumpulla toteutettua lämmitystä, voidaan huomata lämpöpumppauksella olevan mahdollista säästä jopa 85 % sähköenergian vuosittaisesta kulutuksesta. Verrattuna tilanteeseen, jossa kaikki lämpö tuotetaan suoralla sähkölämmityksellä. Taulukon perusteella prosentuaalisesti suurin säästö saadaan kesällä, mutta sähköenergian säästö on suurinta tammikuussa kulutuksen ollessa suurimmillaan.

### Lämpimänkäyttöveden lämmitysenergian tarve

Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian kulutuksen osalta voidaan tehdä samanlainen laskenta, kun tiedetään käyttövettä tuottaessa toteutuva lämpöpumpun COP-luku (taulukko 4). Laskettaessa tehtiin oletus, että jokaisen kuukauden osalta lämpimän käyttöveden energiankulutus pysyy samana sillä ulkolämpötila ei vaikuta siihen merkittävästi (23). Ainoa muuttuja on siis COP-luku, joka on kesäaikaan korkeimmillaan, ja näin ollen säästyvän säästetyn sähköenergian määrä on myös suurin (taulukko 16).

TAULUKKO 16. Lämpimän käyttöveden energiankulutus

Kuukausi	Lämmitysenergia MWh	COP Jäähdytysveden It vaihtelun mukaan	Lämpöpumpun sähköenergian kulutus MWh	Säästetty sähköener- gia %
tammi	26,8	3,2	8	68,7
helmi	26,8	3,2	8	68,7
maalis	26,8	3,2	8	68,8
huhti	26,8	3,2	8	69,1
touko	26,8	3,5	8	71,6
kesä	26,8	3,9	7	74,6
heinä	26,8	4,3	6	76,5
elo	26,8	4,7	6	78,6
syys	26,8	4,2	6	76,0
loka	26,8	3,8	7	73,8
marras	26,8	3,5	8	71,6
joulu	26,8	3,4	8	70,3
<b>Yhteensä</b>	<b>322</b>		<b>89</b>	<b>72,4</b>

Lämpöpumpun vuotuisen sähköenergian kulutuksen perusteella on laskettu siitä syntyvät kustannukset sekä saavutettu säästö verrattuna sähkölämmitykseen ja koostettu ne yhteen (taulukko 17).

TAULUKKO 17. Lämpöpumpun sähkönkulutus ja kustannukset

Rakennuksen energiatohkeus	Lämpöpumpun kuluttama sähköenergia MWh/a	Kulutetun sähkön hinta/€	Säästö suoraan sähkölämmi- tykseen verrattuna/€
<b>Olemassa olevat</b>	823	41134	226566
<b>Matalaenergia</b>	567	28350	156150
<b>Passiivi</b>	425	21266	117134
<b>LKV</b>	89	4450	11650

Vertailemalla sähköenergiasta syntyviä kuluja, voidaan jäähdytysveden lämpöenergiaa hyödyntävällä lämpöpumppauksella olevan todella suuri potentiaali, kun vuotuisissa lämmityskustannuksissa pyritään säästämään. Suuren vuotuisen kustannussäästön ansiosta lämpöpumpun takaisinmaksuaika voidaan saada lyhyeksi, mikä on yksi investoinnin tärkeimmistä kriteereistä. Lämpimän käyttöveden osalta kannattavuutta tulee kuitenkin pohtia, sillä saavutettu hyöty ei ole yhtä merkittävä kuin lämmityskäytössä. Lisäksi käyttöveden korkeamman

lämpötilan tuottamiseen tarvitaan mahdollisesti erillinen lämpötilankorotus tulistin.

#### **4.1.6 Lämpöpumppulaitteiston investointikustannukset**

Lämpöpumppuun tehtävä investointi on suuri yksittäinen kuluerä, joka vaikuttaa siihen, onko lämpöpumppaus ylipäättänsä kannattavaa. Tavoitteena on saavuttaa luonnollisesti mahdollisimman lyhyt takaisinmaksuaika, joka on tehtyjen arvioiden perusteella saatavissa hyvinkin lyhyeksi suuren säästöpotentiaalin vuoksi (taulukko 17). Tarkkoja hintoja lämpöpumppuinvestoinnille ei voida määrittää, mutta suuntaa-antavia laskelmia voidaan tehdä eri valmistajilta saatujen tietojen pohjalta.

Eri toimittajien lämpöpumppu vaihtoehtoja tutkiessa nousi esiin Oilon Scancoolin lämpöpumput, jotka vaikuttivat teknistentietojen perusteella käyttötarkoitukseen sopivilta laitteilta. Hinta-arviot lämpöpumpuille saatiin Oilon Scancoolilta (30). Esimerkiksi Lämpöteholtaan 1 MW:n Oilon Chillheat 2xP450 yhdistelmä-lämpöpumppu, jolla voidaan tuottaa +10-celsiusasteisesta vedestä +70 °C:n lämpöä, kustantaisi noin 178 000 € alv. 0 % (liite 2). Matalampaa lämpöä tuottavat laitteet ovat hieman edullisempia kuin korkeita lämpötiloja tuottavat. Esimerkiksi lämpöteholtaan 1 MW:n lämpöpumppu, jolla voidaan tuottaa +30-celsiusasteista vettä, maksaa noin 110 000 € alv. 0 % (liite 3).

Toinen valmistaja, joka myy tähän tarpeeseen soveltuvia laitteita, on Calefa Oy. Calefan toimittamien lämpöpumppujen ominaisuuksia ja hintoja voi vertailla yrityksen verkkosivuilla olevalla kannattavuuslaskurilla (31). Verrattaessa Calefan lämpöpumppua Oilonin vastaavaan laitteeseen, jolla tuotetaan +10-celsiusasteisesta vedestä +70 °C:n lämpöä 1 MW:n lämpöteholla, maksaa Calefan toteuttamana lämpöpumppu asennuksineen noin 230 000 € alv. 0 % (liite 4). Calefan tarjoama ratkaisu olisi hieman kalliimpi, mutta se sisältää suunnittelun, asennuskulut ja käyttöönoton.

Calefan laskurilla selvitetään eri tehoisten lämpöpumppujen hankintahintaa, kun tuotetun veden maksimilämpötilaksi määritellään mitoitustilanteen mukainen +45 °C (taulukko 18).

TAULUKKO 18. Lämpöpumppujen hinta-arviot (liitteet 5–7)

Rakennuksen tyyppi	Mitoitusteho kW	Calefa lämpöpumpun hinta €
Olemassa olevat	2156	404 465
Matalaenergia	1850	346 086
Passiivi	1230	243 922

Vertailtaessa investointikustannuksia (taulukko 18) saavutettuun säästöön (taulukko 17) on laskettavissa, että lämpöpumppu maksaisi itsensä takaisin noin kahdessa vuodessa. Mikäli arvioidaan, että investoinnista syntyisi todellisuudessa noin 30 % enemmän kuluja, esimerkiksi asennuksien ja tarvittavien muutoksien vuoksi, tulisi takaisinmaksuaika silti olemaan alle kolme vuotta.

Lämpimän käyttöveden tehontarve luvun 4.1.4 perusteella on 161 kW. Lämpöpumpun, joka sopii kuumen +60-celsiusasteisen veden tuottamiseen 161 kW:n teholla, maksaa Calefan hinta-arvion perusteella noin 57 000 € alv. 0 % (liite 8). Tiedettäessä laitteiston hinta, voidaan sitä verrata lämpöpumpun arvioituun vuositaiseen säästöön ja käyttövedtä tuottavan lämpöpumpun takaisinmaksuajaksi tulee noin viisi vuotta. Käyttöveden lämmitykseen ei kuitenkaan välttämättä tarvita omaa lämpöpumppua vaan lämmin käyttövesi voidaan tuottaa myös lämmitysjärjestelmän lämpöpumpulla, johon asennetaan erillinen tulistin käyttöveden lämmitykseen.

Rakennusten lämmityksen toteuttaminen lämpöpumpulla voisi olla hyvin kannattava ja suhteellisen helposti toteutettavissa oleva vaihtoehto, jolla voimalaitoksen jäähdytysveden lämpöenergiaa saadaan hyötykäyttöön. Laitosalueen suuri koko voi kuitenkin rajoittaa lämpöpumppauksen hyötysuhdetta varsinkin majoituskylän osalta, sillä se sijaitsee noin kahden kilometrin etäisyydellä voimalaitoksesta. Lämmönsiirron toteuttamista tulee pohtia, jos majoituskylän lämmitys toteutettaisiin jäähdytysvedestä lämpöpumppaamalla. Vaihtoehtona on siirtää jäähdytysvettä putkistoja pitkin majoituskylän lämpöpumpuille tai tuottaa voimalaitoksella lämpöpumpulla korkeampilämpöistä vettä siirrettäväksi. Matalalämpöistä jäähdytysvettä siirrettäessä veden jäähtyminen olisi vähäisempää, mutta siirrettävät määrät olisivat suurempia. COP-luku olisi myös suurempi, kun

lämpö voitaisiin tuottaa mahdollisimman lähellä käyttökohdetta. Silloin tuotettua vettä ei tarvitsisi siirtää pitkiä matkoja ja näin ollen lämpötila voisi olla alhaisempi.

## 4.2 Lämpöakku

Laitoksesta tuleva jäähdytysvesi on lämpimintä kesäaikaan, jolloin myös merivesi saavuttaa korkeimman lämpötilansa. Silloin myös jäähdytysvesi sisältää eniten lämpöenergiaa. Lämpöenergian kulutus kesäaikaan on kuitenkin huomattavasti pienempää kuin kylminä vuodenaikoina, jolloin taas laitoksesta tulevan jäähdytysvedenlämpötila on matala. Tämän haasteen vuoksi on mietittävä ratkaisua, jossa kesäaikana lämpöenergiaa varastoitaisiin käytettäväksi talviajalle, jolloin lämmityksen tarve on suurimmillaan. Suuresta hyödynnettävästä vesimassasta on etua ajatellen lämpöakkua, sillä kesäaikaan tehtävään lämmitykseen voitaisiin käyttää suuret määrät voimalaitoksesta tulevaa lämpöenergiaa. Silloin lämpöakkua ympäröivä maaperä lämpenisä vähentäen lämpöhäviöitä talviaikaan.

Lämpöenergian varastointi voidaan jakaa lämpötilan mukaan kolmeen eri tyyppiin: matala-, keskilämpö-, ja korkealämpötilavarastointi (32, s. 12). Hanhikiven tapauksessa varastointitapa olisi matalalämpötilavarastointi. Lämpöä voidaan varastoida useisiin eri aineisiin. Yleisemmin sitä varastoidaan veteen, jonka ominaislämpökapasiteetti on korkeampi verrattuna yleisimpien kivilajien ominaislämpökapasiteettiin. Hanhikiven alueella maaperä koostuu 0–6 metriä paksusta irtopeitteestä, joka koostuu pääosin hiekasta ja moreenista. Lisäksi irtomaan kerroksessa esiintyy silttiä, savea sekä turvetta. Irtomaan alla sijaitseva kallioperä koostuu lähes kokonaan metakonglomeraatista (1, s. 144), joka on muodostunut aikojen saatossa sorasta ja hiekasta kivettyneestä sedimenttikivestä (32, s. 5). Metakonglomeraatin ominaislämpökapasiteetti on samaa luokkaa kuin yleisempien muidenkin kivilajien, eli noin 0,750–0,850 kJ/kg °C (32, s. 13). Hanhikiven tapauksessa lämpövarastointi olisi pitkäaikaisvarastointia, jossa käytettäisiin suurta varastoitavaa lämpömäärää. Tässä tilanteessa lämpöhäviöt olisivat verrattain pienet.



Suuret maanalaiset varastointitavat voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin lämmönsiirtymisen toimintaperiaatteiden mukaisesti:

1. Virtausvarasto, jossa kaivantoon tai louhittuun kallioon johdetaan vettä, joka varastoi lämpöä.
2. Johtumisperusteinen varasto, jossa maahan porataan reikiä tai asennetaan putkia, joissa lämmin vesi varastoidaan.
3. Sekoitettu varasto, jossa varastoinnin väliaineena toimivat maa-aines ja vesi yhdessä. (32, s. 40.)

Tarkastellaan esimerkkitilannetta, jossa jäähdytysvettä siirretään varastoon veden lämpötilan saavuttaessa kesällä huippunsa. Tässä tilanteessa veden lämpötila on noin +30 °C. Tiedettäessä, että alle 100 °C:n lämpötiloissa veden ominaislämpökapasiteetti on 4,19 kJ/kg °C (27, s. 178) voidaan laskea yhden vesikilon lämpöenergian määrä, joka on 125,7 kJ/kg. Mikäli lämpövarastoa haluttaisiin hyödyntää lämpöpumpulla, se olisi kannattavaa joulumaaliskuun välisenä aikana. Silloin jäähdytysvettä hyödyntäessä hyötysuhde on huonoimmillaan ja lämmön tarve suurin.

Taulukon 14 perusteella tarvittavan lämmitysenergian määrä tiedetään kyseisenä aikana. Esimerkkinä otetaan tarkasteluun suurin arvioitu kulutus joulumaaliskuun välisenä aikana, mikä on noin 3 100 MWh. Varastoitavan veden määrää arvioidaan, kun tiedetään yhden kilon, eli yhden litran, sisältämä lämpöenergia. Tämä lämpöenergia voidaan laskea kaavalla 6 (27, s. 111).

$$\frac{J}{s} = W$$

KAAVA 6

$$\frac{125,7kJ}{3600s} = 0,349kWh/kg.$$

Kun tiedetään tarvittava lämpöenergian määrä, eli 3 100 MWh, voidaan varastoitavan veden määrä laskea

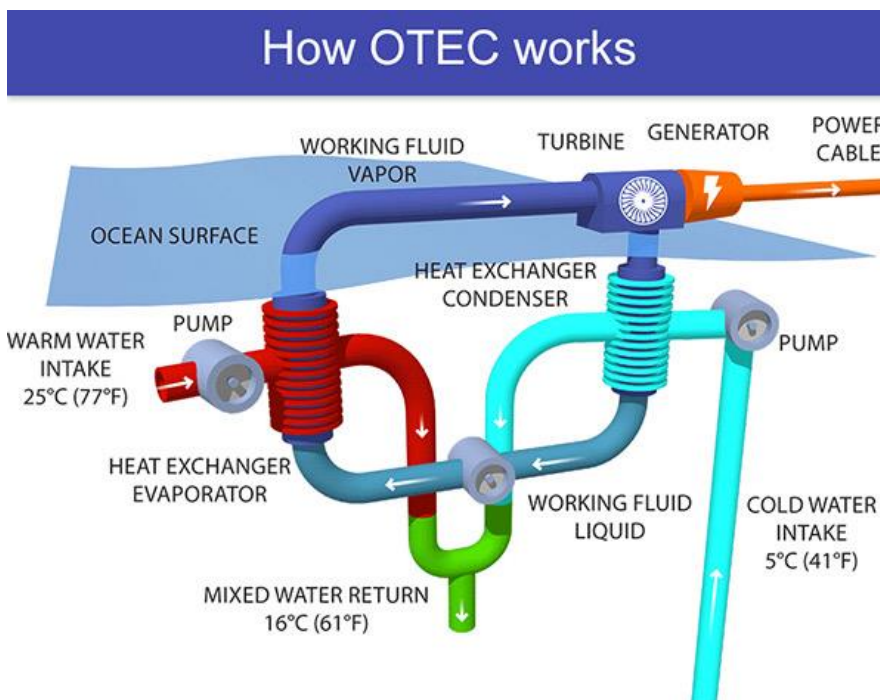
$$\frac{3\,100\,000kWh}{\frac{0,349kWh}{kg}} = 8\,882\,521\,Kg.$$

Yllä näkyvällä laskulla saadaan veden tiheyden,  $1\,000\text{ kg/m}^3$ , avulla laskettua veden vaadittu tilavuus, joka on noin  $8\,882\text{ m}^3$ .

Mikäli lämpövaraston  $+30\text{ °C}$ :n lämpöisestä vedestä tuotettaisiin  $+35\text{ °C}$ :ta lämmitysvettä, mikä vastaa tammikuun keskilämpötilan perusteella lämmitysveden menolämpötilaa. Coolpack-ohjelmalla laskemalla COP-luvuksi saataisiin 11,6. Tuottaessa sama lämmitysvesi jäähdytysveden lämpötilasta  $+10\text{ °C}$  olisi COP-luku 5,5. Mikäli ei huomioida varastoitavan veden jäähdytymistä ja muita lämmönvarastointiin liittyviä haasteita, olisi optimaalisimmassakin tapauksessa COP-luku vain puolet suurempi. Tiedettäessä joulukuun–maaliskuun välisen aikana lämmöntarpeen olevan noin  $3\,100\text{ MWh}$  voidaan lämpöpumpun sähkönkulutuksen laskea olevan COP-luvun perusteella noin  $310\text{ MWh}$ . Vastaavasti hyödynnettäessä suoraan laitoksen jäähdytysvettä olisi sähkön kulutus taulukon 15 mukaan noin  $554\text{ MWh}$ , jolloin sähkön hinnan ollessa  $50\text{ €/MWh}$ , olisi saavutettava säästöä noin  $12\,000\text{ €}$ , neljän talvikuukauden aikana. Säästettyä summaa voidaan pitää kuitenkin erittäin vähäisenä verrattuna lämpöakun investoinnin ja käytön aiheuttamiin kustannuksiin, joten lämmönvarastointia ei ole tarpeellista käsitellä enempää.

### 4.3 OTEC

OTEC, eli Ocean Thermal Energy Conversion, tarkoittaa laitteistoa, jolla voidaan hyödyntää meriveden pinnan ja pohjan välistä lämpötilaeroa sähköntuotantoon eräänlaisen lämpöpumppuprosessin avulla. Maailmalla käynnissä olevissa OTEC-tekniikkaa hyödyntävissä projekteissa lämpötilaero syntyy noin  $+25\text{ °C}$ :n pintalämpötilan ja syvän veden noin  $+5\text{ °C}$ :n lämpötilan välillä (kuva 11). Laitteiston toiminnan vaatimat olosuhteet sijaitsevat ympäristössä, jossa pinnan ja syvempien vesikerrosten lämpötilaero on ympäri vuoden noin  $20\text{ °C}$ :ta. Käytännössä parhaat olosuhteet sijaitsevat päiväntasaajan lähetyillä sijaitsevilla merialueilla. (33.)



KUVA 11. OTEC-järjestelmän toimintaperiaate (34)

Suomen olosuhteissa laitteiston käyttö vesistöissä suurten vuosittaisten lämpötilavaihteluiden ja pintaveden matalien lämpötilojen takia ei ole mahdollista. Hanhikiven tapauksessa tilanne on hieman erilainen, koska laitoksesta tuleva lämmin jäähdytysvesi kattaisi laitteiston lämpimänvedentarpeen.

Tutkittaessa Hanhikiven läheisillä merialueilla tehtyjä tutkimuksia meriveden lämpötilasta selviää, että meren eri kerroksissa, välillä 0–12 metriä, suurimmat lämpötilan erot ovat noin 10 celsiusastetta. Vuodenajalla on suuri merkitys eri syvyyskerrosten lämpötilaan ja vain kesä-elokuun välisenä aikana päästään ha-luttuun 10 °C:n eroon pinnan ja pohjan välillä. Laitteiston vaatima 20 °C:n lämpötilaero voidaan saavuttaa, kun kesäaikaan jäähdytysveden lämpötila on +25...+30 °C:n välillä ja samaan aikaan veden lämpötila 12 metrin syvyydessä on noin +8 celsiusastetta. (1, s. 124–125.)

Yksi vaihtoehto riittävän lämpötilaeron saavuttamiseksi on hyödyntää ulkoilman ja jäähdytysveden lämpötilojen eroa. Kyseinen vaihtoehto olisi mahdollista kylmimpinä kuukausina, jolloin ilman lämpötila laskee 0 °C:n alapuolelle ja voidaan saavuttaa vaadittu 20 °C:n lämpötilaero. Ilmasta lämpöä siirtäessä on kuitenkin huomioitava sen vettä huonommat lämmönsiirto-ominaisuudet.

OTEC-tekniikalle sellaisenaan ei ole juurikaan taloudellista potentiaalia johtuen sen lyhyestä vuosittaisesta käyttöajasta ja OTEC-laitteiston tutkimusvaiheessa olevasta tekniikasta, mutta sen käyttömahdollisuuksia kannattaa tutkia lisää myöhemmin tämän tekniikan yleistyessä.

#### **4.4 Pihojen sulatus talvella**

Voimalaitoksen alueelle tulee asfaltoituja alueita, joiden talviaikaiseen sulanapitoon voitaisiin mahdollisesti hyödyntää jäähdytysveden lämpöenergiaa. Talviaikaan pihojen kunnossapidosta syntyy kustannuksia esimerkiksi auruksen ja hiekoituksen vuoksi. Vaihtoehtoisesti voidaan ajatella, että tärkeimmät ja eniten käytetyt piha-alueet pidettäisiin sulana talvikauden aikaan, jotta aurausta ja hiekoitusta ei tarvitsisi suorittaa. Lämpöenergiana sulatusjärjestelmässä hyödynnettäisiin voimalaitoksen jäähdytysvettä joko suoraan tai lämpöpumpulla.

Päällystetyiden alueiden sulanapito talviaikaan on nykyään yleistä kaupunkien keskusta alueilla, joissa lumenaurauksesta ja hiekoittamisesta on haluttu luopua. Hyvänä esimerkkinä käy Oulun keskustassa sijaitsevan Rotuaarin sulanapito talviaikaan. Rotuaarin tapauksessa lämmitykseen tarvittava lämpöenergia otetaan lämmönvaihtimilla ensisijaisesti kaukolämmön paluuvedestä, mutta tarpeen vaatiessa myös tulopuolen lämpöä käytetään, mikäli lämmityksen tarve kasvaa kylmemmissä oloissa.

##### **4.4.1 Sulanapidon hyötyjen ja haittojen vertailu**

Suurimmat hyvät puolet sulanapidossa ovat pihojen talvikunnossapidon merkittävä väheneminen ja siitä saatavat säästöt. Suolauksen ja hiekoituksen tarve poistuu eikä hiekkaa ei kulkeudu kiinteistöiden sisätiloihin, mikä osaltaan vähentää siivouksen tarvetta. Myöskään keväistä piha-alueiden hiekanpoistoa ei tarvitsisi suorittaa. Yhtenä merkittävänä seikkana voidaan pitää liukastumisonnettomuuksista johtuvien tapaturmien ehkäisemistä. Sulana pidetyille alueelle sataanut lumi sulaa nopeasti, jolloin kinoksia tai kasoja ei pääse kertymään, minkä seurauksena auruksen tarve on käytännössä olematon. (35, s. 9.)

Sulanapitoon liittyy myös mahdollisia haittapuolia, joista suurimpana voidaan pitää sulanapitojärjestelmän investointikustannuksia. Investointikustannukset tulisivat olemaan merkittävät. Mikäli järjestelmää ei suunnitella tarpeeksi tehokkaaksi, voi lunta ja sohjoa kertyä pinnoille kun lunta sataa kerralla suuria määriä. Veden lammikoituminen voi myös olla ongelma, mikäli viemäröintien suunnittelu on puutteellista. Sulana pidetyn ja sulattamattoman alueen rajoille voi myös muodostua liukastumisvaarallisia paikkoja, joiden huomiotta jättäminen voi aiheuttaa tapaturmia. Myös käyttökatkokset sulanapitojärjestelmässä voivat aiheuttaa pintojen äkillisen jäätymisen, mikä voi osaltaan kasvattaa tapaturmariskejä. (35, s. 9.)

#### **4.4.2 Sulatuksen toteuttaminen**

Lämmitysjärjestelmä toteutetaan yleensä nestekiertoisella lämmitysputkistolla tai sähkölämmityskaapeleilla. Tässä työssä keskitytään nestekiertoiseen ratkaisuun, koska siinä runsaasti saatavilla olevaa jäähdytysveden lämpöenergiaa voidaan käyttää hyödyksi. Piha-alueen lumen sulatukseen tarvittava lämpöteho on noin 300 W lämmitettyä neliometriä kohden (35, s.11). Lämpöteho on järkevintä tuottaa mahdollisimman edullisella ja hyvin saatavilla olevalla energianlähteellä, kuten tässä tapauksessa jäähdytysvedellä. Piha-alueen sulana pitämisen peruseriaatteena voidaan pitää sitä, että lämmitettävän pinnan lämpötila pidetään vähintään +3 °C:sa. Lämmitysputkistoissa kiertävän nesteen lämpötilan optimaalisena vaihteluvälinä pidetään +35–39°C:ta tilanteessa, jossa putket ovat 150–200 mm lämmitettävän pinnan alapuolella. (35, s.11.)

Jäähdytysveden lämpötila vaihtelee +10–15°C:n välillä loka-huhtikuun välisenä aikana, jolloin sulana pidolle voi olettaa olevan tarvetta. Mikäli sulatus haluttaisiin toteuttaa suoraan jäähdytysvedenlämmön avulla, vaatisi se todella suuren veden virtauksen sekä mahdollisesti putkien asentamisen lähemmäksi pintaa. Parempi vaihtoehto olisikin toteuttaa lämmitys lämpöpumpulla, jolla saadaan tuotettua käyttötarkoituksen kannalta sopivanlämpöistä lämmönsiirtonestettä.

Seuraavana lasketaan lämpöpumppauksen COP-luku, jotta voidaan arvioida kulutettavaa sähköenergiaa. Sulatusjärjestelmän lämpötilaksi otetaan +37 °C ja

jäähdytysveden lämpötilaksi +10 °C, joka vastaa tammikuun olosuhteita. Cool-pack-ohjelmalla laskemalla saadaan COP-luvuksi 5,27. Kun tiedetään, että sulatukseen tarvitaan noin 300 W/m<sup>2</sup> lämpöteho ja arvioidaan sulana pidettävän alueen pinta-alaksi esimerkiksi 1 000 m<sup>2</sup>, kuluu kuukaudessa jatkuvalla lämmityksellä energiaa seuraavasti:

$$\frac{300W}{m^2} \times 1000m^2 \times 31d \times 24h = 223\,200\,kWh/kuukausi.$$

Lämpöpumpun sähkönkulutus kuukaudessa voidaan laskea kertomalla lämmitysenergian tarve COP-luvun käänteisluvulla:

$$223200kWh \times \frac{1}{5,27} = 42\,352kWh/kuukausi.$$

Sähkön hinnan ollessa 50 €/MWh on kuukausittaisen sulanapidon hinta 2 118 €. Jos pihoja lämmitetään esimerkiksi marraskuusta toukokuuhun, voidaan sähkön hinnaksi arvioida noin 10 000 €. Todellisuudessa kulutus tulisi vaihtelevaan sääolosuhteiden mukaan.

Pelkkään pihojen lämmityskäyttöön lämpöpumpun investointi tulisi olemaan kallias. Myös sulatettu pinta-ala tulisi luultavasti olemaan suurempi kuin 1 000 m<sup>2</sup> ja kustannukset kasvaisivat entisestään. Yksi mahdollinen vaihtoehto olisi toteuttaa sulatus osana rakennusten lämmitystä lämpöpumpun avulla. Esimerkiksi tuotettaessa lämmitysjärjestelmän tarvitsemaa lämpöä lämpöpumpulla saataisiin erillisellä alijäähdytyslauhduttimella hyödynnettyä kylmäaineeseen jäljelle jäänyttä lämpöä. Samalla parannettaisiin myös lämpöpumpun prosessin kokonaishyötysuhdetta ja toimivuutta kylmäaineen palatessa paisuntaventtiiliin kylmempänä.

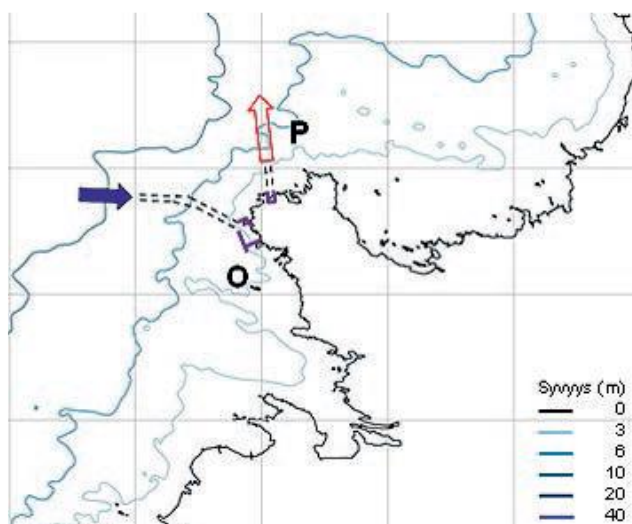
#### **4.5 Jäähdytysveden ottokanavan sulanapito talviaikaan**

Talvella meren ollessa jääpeitteetön on olemassa riski, että jäähdytysveden ottokanavaan syntyy alijäähtynyttä vettä. Joutuessaan kanavan rakenteisiin alijäähtynyt vesi voi kiteytyä erittäin nopeasti kiinteäksi jääksi. Tätä kutsutaan niin sanotuksi suppoilmiöksi. Suppo voi syntyä, kun ulkolämpötila laskee 0 °C:n ala-

puolelle ja voimakas tuuli aiheuttaa veteen turbulenssin. Turbulenssin vuoksi-pinnalla syntyneet jääkiteet joutuvat pinnan alle, ja sitä kautta imuputkistoon. Imuputkistossa ne kiteytyvät rakenteisiin virtauksen häiriintyessä. Rakenteisiin kertynyt jää voi haitata, tai pahimmassa tapauksessa estää, jäähdytysveden virtauksen. (36, s.7.)

Supon syntymistä voitaisiin estää johtamalla imupäähän lämmintä vettä, mikä estäisi veden alijäähtymistä. Tähän tarkoitukseen lämmennyt jäähdytysvesi voisi olla mahdollinen ratkaisu, koska sitä on runsaasti saatavilla ja se johdetaan joka tapauksessa mereen. Jäähdytysveden suuren saatavilla olevan määrän vuoksi on sillä mahdollista estää alijäähtyneen veden kiteytyminen, vaikka sen lämpötila on talvella vain noin +10 °C. Jäähdytysvettä ei kuitenkaan kannata lämmittää turhaan silloin, kun supon syntymisen mahdollisuutta ei ole.

Kuvassa 12 näkyy imukanavan ja purkuputken sijainnit Hanhikivenniemellä. Imukanava tulee sijaitsemaan aallonmurtajilla suojatussa satama-altaassa 4–11 metrin syvyydessä. Altaan syvyys tulee olemaan 8–12 metriä. (1, s. 131.) Purkuveden aiheuttama lämpövaikutus koskee myös ottokanavan sijaintia. Tietokomallinnusten mukaisesti purkuvesi pitää jääalueen sulana ja ohuena pääasiassa Hanhikiven pohjois- ja itäpuolella. Erilaisten olosuhteiden vaikuttaessa virtauksiin, on mahdollista, että jää pysyy sulana myös länsipuolelta Hankikivenniemeä. Tämä aiheuttaisi tilanteen, jossa kanavan päällä oleva vesimassa pysyy sulana koko talven. Sulana pysyvä vesi taas aiheuttaa vaaran supon syntymiseen. (1, s. 138.)



KUVA 12. Imu- ja purkukanavan sijainti (1, s. 132)



## 5 KÄYTTÖKOhteITA LAITOSALUEEN ULKOPUOLELLA

### 5.1 Käyttö kaukolämpönä

Jäähdytysveden käyttö kaukolämpönä ei ole suoraan mahdollista matalan lämpötilan takia. Mikäli haluttaisiin tuottaa kaukolämpöä vastapainevoimalaitoksen tapaan, prosessia täytyisi muuttaa. Tämä taas laskisi sähköntuotannon hyötysuhdetta. Kaukolämpökäyttöön soveltuvan lämmön tuottaminen lämpöpumpulla voisi olla periaatteessa mahdollista, mutta lämpöpumpun COP-luku olisi silloin vain hieman yli 1. Erittäin huonon COP-luvun takia sähköenergiaa kuluisi siis lähes saman verran kuin lämpöä saataisiin tuotettua, mikä tekisi lämpöpumpauksesta kannattamatonta. Ongelmana on myös se, että lämmön tarve Raahen ja Pyhäjoen alueella on pieni. Näin ollen kaukolämmöntuotanto ei olisi kannattavaa. Myös kaukolämmön siirtämistä putkistoja pitkin Ouluun on harkittu, mutta huomioiden Oulun kaukolämmön tuotantorakenteen sekä noin 100 kilometrin etäisyyden, on sen todettu olevan kannattamatonta (1, s. 57).

### 5.2 Asuinalueen lämmitys

Ydinvoimala tulee työllistämään käytön aikana noin 400–500 henkilöä. Kun oletetaan, että kaikki työntekijät tulisivat talousalueen ulkopuolelta ja heistä 85 % muuttaisi asumaan Pyhäjoen talousalueelle, olisi keskimääräisellä perhekoolla 2,1 laskettuna alueelle tulevien ihmisten määrä noin 700–900. (1, s. 188.) Mahdollisen muuttoliikkeen takia Pyhäjoen talousalueelta tulisi löytää asuntoja kasvaneelle väestölle, jolloin asuntojen tai jopa asutusalueiden rakentaminen voitulla ajankohtaiseksi. Jos mahdollisia asuntoja rakennettaisiin, niiden sijoituksessa voitaisiin ajatella mahdollisuutta, että lämmitysenergian tarve täytettäisiin ydinvoimalasta saatavan jäähdytysveden energialla. Mahdollisten asuntojen sijoittamista laitoksen läheisyyteen rajoittaa kuitenkin viiden kilometrin suojaetäisyys, jonka sisään ei saa sijoittaa tiheää asutusta tai muita rakennuksia, joissa oleskelee tai käy huomattava määrä ihmisiä (1, s. 91).

Ajatellessa lämpöenergian siirtämistä kohteeseen tulee miettiä sen järkevyyttä ja siihen soveltuvia menetelmiä. Kuten aiemmin tässä työssä on mainittu, ei

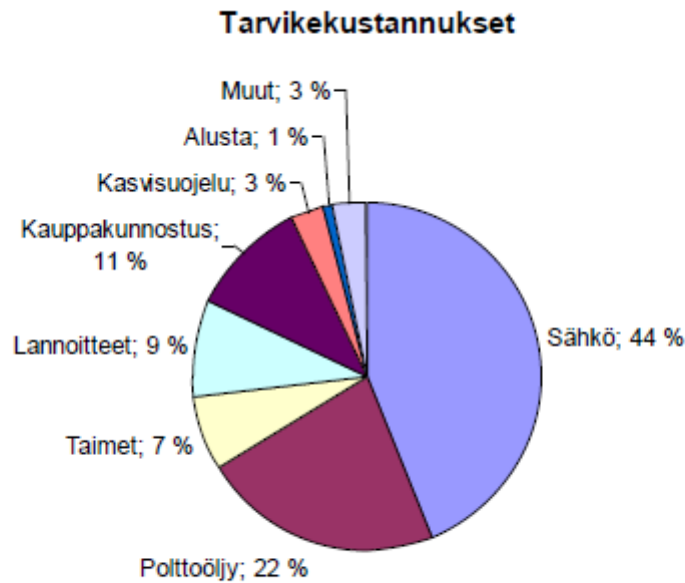
ydinvoimalan jäähdytysveden lämpötila suoraan sovi rakennusten lämmitykseen. Olisi siis käytettävä lämpöpumppausta, jolla tuotettu kuuma vesi siirrettäisiin esimerkiksi kaukolämpöputkia pitkin asuinalueelle. Erona kappaleessa neljä tehdyille laskelmille rakennuksen lämmityksessä on se että etäisyys tulisi olemaan ainakin viisi kilometriä, jolloin tuotetun veden täytyisi olla huomattavasti kuumempaa lämmönsiirrosta aiheutuvien häviöiden takia, mikä taas aiheuttaisi huonomman COP-arvon, kuin laitosalueen kiinteistöitä lämmittäessä. Lisäksi mahdollisten kaukolämpöputkien rakentamisesta aiheutuisi merkittäviä kustannuksia.

### **5.3 Kasvihuoneen lämmitys**

Kasvihuoneiden lämmitys talviaikaan vie paljon energiaa. Jäähdytysveden ylijäämälämpöä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää kasvihuoneiden lämmitykseen, koska sitä on runsaasti saatavilla ympäri vuoden. Energiaa jäähdytysvedestä voitaisiin hyödyntää lämpöpumpun avulla. Lämpöpumpussa lämpötila nostettaisiin kasvihuoneen lämmitysjärjestelmän vaatimalle tasolle.

#### **5.3.1 Suomalaiset kasvihuoneet**

Tyypillisesti suomalainen kasvihuone on perheyrityksen hoitama ja on pinta-alaltaan noin 2 500 m<sup>2</sup> (37, s. 3). Kasvihuoneissa lähes 60 prosenttia tuotantokustannuksista kuluu tuotantotarvikkeisiin. Tästä 60 %:sta viidennes tulee lämmityskustannuksista (37, s. 14) (kuva 13). Lämmityksen suurien kustannuksien vuoksi on mietittävä edullisimpia vaihtoehtoja lämmityksen toteutukseen.



KUVA 13. Tarvikekustannuksien osuudet kasvihuoneissa (37, s. 14)

### 5.3.2 Kasvihuoneen lämmitysratkaisut

Maalämpö, joka kerää lämmön maaperästä lämpöpumpulla on todettu toimivaksi ratkaisuksi kasvihuoneiden lämmityksessä (37, s. 19). Hyödynnettäessä lämmönlähteenä voimalaitoksen jäähdytysvesiä voitaisiin COP-arvo saada paremmaksi kuin maalämmöllä. Voimalaitoksen jäähdytysveden lämpötila on korkeampi verrattuna maalämpöön, joka hyödyntää maaperän noin  $-3...+3\text{ °C}$ :n lämpötilaa. Maalämpö ottaa nimensä mukaisesti lämpönsä maasta. Samalla se jäähdyttää maaperää, mikä aiheuttaa COP-arvon huonontumista maan kylmetessä. Jäähdytysveden lämpöä käyttäessä lämpöä saataisiin tasaisesta ja enustettavasti vuoden ympäri, koska jäähdytysveden virtausmäärät ovat valtavat.

### 5.3.3 Jäähdytysveden hyödyntämistä lämpöpumpulla kasvihuoneessa

Otetaan esimerkkitapaukseksi kasvihuone, jossa kasvatetaan ympärivuotisesti kurkkua. Maa- ja elintarviketalouden taloustutkimuksen mukaan valotetussa kasvihuoneessa kasvatetun kurkun ympärivuotiseen viljelyyn kuluu lämpöenergiaa noin 1 300 MJ viljeltyä neliometriä kohden vuodessa. Kilowattitunteina se vastaa 361 kWh lämpöenergiaa. Energiaa kuluu myös valaistukseen  $225\text{ W/m}^2$  vuodessa, myös valaistus lämmittää kasvihuonetta. (37, s. 24). Esimerkissä

otetaan tarkasteluun lämmitysjärjestelmä, joka käyttää yksinkertaista radiaattori-lämmitystä ja jossa kiertävän veden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Kasvihuoneen viljelyspinta-alaksi oletetaan 2 500 m<sup>2</sup>, joka vastaa tyypillistä suomalaista kasvihuonetta. Lasketaan mitoitustilanteen esimerkki tammikuussa, jolloin ulkolämpötila laskee hyvin alhaiseksi. Lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilan arvioidaan olevan silloin +50 °C.

Vertaillaan jäähdytysvettä hyödyntävän ja maalämpöä käyttävän lämpöpumpun eroja. Häviöihin ja asteisuuksiin sovelletaan aiempien lämpöpumppulaskujen arvoja, poikkeuksena maalämpöpiirin höyrystimen asteisuus, joka on 5 k. (14, s. 21). Otetaan mitoitustilanteeksi tammikuu, jolloin lämmöntarve on suurimmillaan. Hyödyntäessä jäähdytysveden lämpötilaa +10 °C, kaavalla 2 ja Coolpack-ohjelmistolla laskemalla saadaan COP-luvuksi 3,92 tuotettaessa +50-celsiusasteista lämmitysvettä. Maalämpöpumpulla hyödynnettävän maaperän lämpötilan oletetaan olevan noin +2 °C, jolloin samassa tilanteessa COP-luvuksi saataisiin 3,20. Todellisuudessa maalämpöpumpulla saatu COP-luku olisi huonompi, koska mitä suuremmalla teholla lämpöä maasta pumpataan, sitä kylmemmäksi maaperä jäähtyy huonontaen COP-lukua.

Tiedettäessä, että yhden viljelyn neliömetrin vuotuinen lämmitystarve on 361 kWh:a, tammikuun osuus lämmitystarpeesta on 16,3 % (taulukko 2). Näin ollen yhden neliömetrin lämpöenergian tarpeeksi saadaan tammikuussa 59 kWh. Jäähdytysvettä lämpöpumpulla hyödyntämällä saadaan kulutetuksi sähköenergiaksi 15,1 kWh/m<sup>2</sup>, vastaavasti maalämpöpumpulla kulutus olisi noin 18,4 kWh/m<sup>2</sup>. Pinta-alaltaan 2 500 m<sup>2</sup> kasvihuoneessa jäähdytysveden lämpöenergiaa käyttämällä voitaisiin säästää tammikuun aikana maalämpöpumppuun verrattuna noin 8,25 MWh sähköenergiaa, joka 50 €/MWh hinnalla tekee säästöiksi noin 413 €.

Lasketaan saman kasvihuoneen lämmitys huhtikuussa, jolloin voimalaitoksesta tulevan jäähdytysveden lämpötila on noin +15 °C. Maalämpöpumpun tapauksessa maan lämpötilana käytetään +2 °C:ta, vaikka todellisuudessa koko talven kestänyt lämmitys jäähdyttäisi maata. Tuotettavan lämmön arvioidaan olevan +35 °C korkeampien ulkolämpötilojen vuoksi. Jäähdytysvedellä saataisiin COP-

luvuksi noin 6,4, kun vastaavasti maalämmöllä COP-luvuksi saadaan 4,3. Toukokuun lämmitysenergian kulutus koko vuoden tarpeesta on noin 9,2 %, joka vastaa lämpöenergiana noin 22,4 kWh/m<sup>2</sup>. Jäähdytysvettä hyödyntämällä yhden neliömetrin sähköenergiankulutus olisi silloin noin 3,5 kWh ja vastaavasti maalämmöllä 5,2 kWh. Koko kasvihuoneessa säästetyn sähköenergian määrä olisi siis 4,2 MWh, mikä vastaa noin 210 €:n rahallista säästöä.

### **Lämpöpumppauksen kannattavuus verrattuna hakelämmitykseen**

Verrataan tammikuun energiankuluja lämpöpumpun ja yleisesti lämmityksessä käytetyn puuhakkeen välillä. Hakkeen verottomana hintana voidaan pitää tilastokeskuksen mukaan noin 21 €/MWh alv. 0 % (38). Tammikuun lämmitysenergian kulutukseksi on arvioitu 147,5 MWh. Arvioitaessa, että hakekattilan hyötysuhde on esimerkiksi 80 %, saadaan kulutetun hakkeen kuukausihinnaksi tammikuussa noin 3 900 €. Jäähdytysvettä hyödyntävällä lämpöpumpulla kuluu saman lämpömäärän tuottamiseen noin 37,8 MWh, joka tulisi sähkön omakustanhinnalla 50 €/MWh maksamaan noin 1 887 €. On kuitenkin huomioitava, että jos sähkö ostettaisiin verkosta yritysten keskimäärin ostamalla hinnalla, joka on tilastokeskuksen mukaan noin 80 €/MWh (39), hinta olisi noin 3 020 €. Näiden tietojen perusteella voidaan sanoa, että lämpöpumppaus on energian hinnan kannalta edullisempi vaihtoehto. Lisäksi lämpöpumppauksen hyötysuhde kasvaa meren lämmitessä ja saavutettu säästö kasvaa.

Investointikustannukset ovat hakekattilan osalta huomattavasti pienemmät kuin lämpöpumpulla. Esimerkiksi Calefan 250 kW:n lämpöpumppu, jolla voidaan tuottaa +10 °C:n lämpötilasta noin +50-celsiusasteista lämmitysvedettä, maksaa noin 70 000 € alv. 0 %.(liite 9) Vastaavasti 250kW:n SET Futura hakekattila maksaa noin 22 000 € (40). Näiden lukujen perusteella voidaan hakekattilan investointikustannusten arvioida olevan noin kolmasosa vastaavatehoisen lämpöpumpun kustannuksista.

Yhteenvetona lämpöpumppauksen hyödyntämisestä kasvihuoneen lämmitykseen voidaan todeta seuraavaa: mikäli kasvihuone voidaan sijoittaa suojavyöhykkeen sisälle ja mahdollisimman lähelle voimalaitosta, on lämpöpumppaus varteenotettava vaihtoehto. Mikäli mahdollinen kasvihuone jouduttaisiin

kuitenkin rakentamaan suojavyöhykkeen ulkopuolelle, nousisivat investointikustannukset sekä siirrosta aiheutuvat häviöt korkeiksi ja lämmityksen tuottaminen olisi jäähdytysvedestä lämpöpumpulla kannattamatonta. Silloin lämpö olisi järkevämpi tuottaa esimerkiksi maalämmöllä. Pelkän lämmönsiirtoputken investointikustannuksia voi arvioida, kun tiedetään, että eristetyn DN20 kaukolämpöputken (Mpuk) rakentaminen maksaa keskimäärin 135 € metriltä (41, s. 3). Tällöin pelkän lämmönsiirtoputken rakentaminen viiden kilometrin suojavyöhykkeen ulkopuolelle maksaisi huomattavan paljon.

## **5.4 Biopolttoaineen kuivatus**

Biopolttoaineissa, kuten puussa, on tuoreena suuria määriä vettä, mikä rajoittaa sen käyttöä. Perinteisesti puun kuivaminen tapahtuu hitaasti kasoissa tuulen ja auringon vaikutuksesta. Puun lisääntyneen energiakäytön takia puun kuivumisesta on haluttu nopeuttaa erilaisilla kuivaimilla, jotka kuluttavat paljon energiaa nostaen kuivattavan polttoaineen hintaa.

### **5.4.1 Hakkeenkuivatus**

Yleisimpien Suomessa kaadettavien puulajien vesipitoisuus eli kosteus prosentti, vaihtelee kaatotuoreena 40–55%:n välillä puulajista ja kaatamisen ajankohdasta riippuen. Suurin osa Suomessa käytettävästä hakkeesta on palstoilla ja kasoissa luonnonolosuhteissa kuivunutta. Kosteus luonnonkuivaamassa hakkeessa vaihtelee tavallisesti välillä 30–50 %, mutta erittäin onnistuneessakaan luonnonkuivauksessa ei päästä alle 25 %:n kosteuteen. Keinokuivauksella sen sijaan saavutetaan noin 15 %:n kosteus. (42, s. 32.)

Keinokuivaus voidaan toteuttaa joko kylmä- tai lämminilmakuivauksella. Kylmäilmakuivauksessa kuivaus tapahtuu ulkoilman lämpötilassa tai nostamalla sitä muutamilla celsiusasteilla esimerkiksi auringonsäteilyn avulla. Lämminilmakuivauksessa kuivausilman lämpötila on alle sata astetta, tavallisesti 60–70 °C:n välillä. Lämminilmakuivaus mahdollistaa nopeamman kuivauksen sekä ympäristöystävällisen toiminnan toisin kuin kylmäilmakuivaus.

Lämpöenergian kulutus on suurin yksittäinen kuluerä lämminilmakuivauksessa, mutta sähköenergiaa kuluu myös ilmapuhaltimien käytössä noin 10 kWh irtokuutiometriä kohden. Lämmitysenergian tarve riippuu pitkälti ulkolämpötilasta, josta lämmitettävä kuivausilma otetaan. Esimerkiksi ilman lämmöntalteenottoa toteutetun kuivurin lämpöenergian kulutus +15 °C:n ulkolämpötilassa on noin 100 kWh yhtä irtokuutiometriä kohden. Talvella –15 °C:n ulkolämpötilassa lämmitysenergian tarve yhdelle irtokuutiometrille on noin 160 kWh. (43, s. 13.)

#### **5.4.2 Jäähdytysveden käyttö hakkeenkuivaukseen**

Hakkeenkuivatukseen jäähdytysveden lämpöenergiaa voidaan hyödyntää lämpöpumpulla, jolla kuivausilman lämpötila nostettaisiin +60–100 °C:seen. Laskeetaan esimerkkitapauksissa yhden hakeirtokuutiometrin ( $\text{i-m}^3$ ) kuivauskustannukset. Kuivaus toteutetaan lämminilmakuivauksella sitä varten rakennetussa kuivainrakennuksessa, jossa on lämmöntalteenottojärjestelmä vähentämässä lämpöenergian kulutusta.

Esimerkkitilanteessa 1 ulkolämpötila on +15 °C ja lämmitysenergian lähteenä käytetään ydinvoimalan +20-celsiusasteista jäähdytysvettä. Esimerkissä 2 käytetään ulkolämpötilana -15 °C:tta ja hyödynnettävänä jäähdytysveden lämpötilana käytetään talviajan +10 °C:tta. Kuivaimessa tarvittavaksi lämpötilaksi oletetaan 60 °C:tta, jolloin veden haihtuminen on tehokasta. Yhden irtokuutiometrin kuivaamiseen tarvittava lämpöenergia on +15 °C:n ulkolämpötilassa noin 100 kWh ja -15 °C:ssa noin 160 kWh (43, s. 13).

Kun mietitään lämpöpumppausta kuivatus käyttöön, joudutaan jäähdytysveden lämpöenergia ensin siirtämään höyrystimessä kylmäaineeseen, josta se lauhduttimessa siirretään kuivausilmaan. Lämpöpumpun asteisuudet ja häviö voidaan olettaa lauhduttimen asteisuutta lukuun ottamatta olevan samat kuin kapaleessa 3.4.2. Lauhduttimen asteisuuden arvona siirrettäessä lämpöä ilmaan käytetään 15 kelvin astetta (14, s. 21).

#### **Esimerkki 1**

Kun halutaan tuottaa lämmitysilmaa talvella ulkolämpötilan ollessa –15 °C ja samaan aikaan on jäähdytysveden lämpötila +10 °C. Kyseisen lämpötilaeron

avulla COP-luvuksi saadaan Coolpack-ohjelmalla laskemalla +60-celsiusasteista kuivausilmaa tuottaessa 2,66. Lasketaan lämpöpumpun kuluttama sähköenergia yhtä irtokuutiota kohden:

$$\frac{160kWh}{m^3} \times \frac{1}{2,66} = 60,15kWh/im^3.$$

## Esimerkki 2

Tässä tapauksessa lämmitys tapahtuu kesällä +15 °C:n ulkolämpötilassa. Lämpöpumpulla hyödynnettävän jäähdytysveden lämpötilaksi arvioidaan +20 °C. COP-luvuksi saadaan kyseisessä tilanteessa 3,17. Lasketaan COP-luvun avulla sähkön kulutus

$$\frac{100kWh}{m^3} \times \frac{1}{3,17} = 31,54kWh/m^3.$$

Kun tiedetään lämmitykseen tarvittavan sähköenergia, voidaan yhden irtokuution kuivauksesta syntyvät kustannukset laskea. Huomioitavaa on myös ilmapuhaltimien sähkökulutus, joka vaihtelee välillä 6–10 kWh/im<sup>3</sup>. (42, s. 33). Sähkön hintana käytetään 50 €/MWh.

$$\text{Tapaus 1 } \left( \frac{60,15kWh}{im^3} + \frac{10kWh}{im^3} \right) \times \frac{0,05\text{€}}{kWh} = 3,5\text{€/i-m}^3.$$

$$\text{Tapaus 2 } \left( \frac{31,54kWh}{im^3} + \frac{10kWh}{im^3} \right) \times \frac{0,05\text{€}}{kWh} = 2,1\text{€/i-m}^3.$$

Lasketaan kuivauksella saavutettavan tehollisen lämpöarvon ja hinnan kasvu. Laskua suorittaessa tiedetään, että 50 %:n kosteudessa yksi irtokuutiometri painaa noin 320 kg ja 15 %:n kosteudessa 188 kg (44, s. 14). Kosteudessa 50 % hakkeen tehollinen lämpöarvo on noin 2,4 kWh/kg ja 15 %:n kosteudessa noin 4,5 kWh/kg (44, s. 12). Näiden tietojen perusteella tehollinen lämpöarvo on kosteudessa 50 % noin 768 kWh/i-m<sup>3</sup> ja 15 %:n kosteudessa noin 846 kWh/i-m<sup>3</sup>. Saavutettu Lämpöarvon kasvu on siis noin 78 kWh/i-m<sup>3</sup>. Tilastokeskukselta saatavan voimalaitospolttoaineen hintatietojen perusteella vuonna 2015 hakkeen hinta on ollut noin 21 €/MWh (45). 78 kWh:n kasvu tehollisessa lämpöarvossa kasvattaa hakkeen hintaa noin 1,5 €, joka ei kata edes sähköenergiaan kuluneita kustannuksia.



Yhteenvetona voidaan todeta, ettei hakkeenkuivaus lämpöpumppauksella ole taloudellisesti kannattavaa, sillä saatava rahallinen hyöty jää pieneksi. Lisäksi investointikustannukset huonontaisivat kannattavuutta entisestään.

## **5.5 Biokaasun tuotanto**

Biokaasun tuotanto vaatii lähes aina ulkopuolista lämmön tuontia prosessiin, koska biokaasun tuotannon aikana syntyy vain vähän lämpöä (46, s. 5). Hanhikiven tapauksessa jäähdytysveden käyttö biokaasuprosessiin tuottaisi välillisesti ylijäämälämmöstä kaasua, jota voitaisiin hyödyntää monessa eri käyttökohteessa. Biokaasua voitaisiin käyttää esimerkiksi ajoneuvoissa, jotka tulevat Fennovoiman käyttöön. Kaasu voitaisiin myös myydä tai käyttää sähkön ja lämmön tuotantoon.

Biokaasuksi kutsutaan kaasua, jota saadaan, kun orgaaniset aineet hajoavat kaasuseokseksi, jonka tärkeimpänä komponenttina on metaani. Biokaasua voidaan polttaa sellaisenaan tai jalostaa biometaaniksi käytettäväksi metaanin tavoin. Biokaasua voitaisiin tuottaa laitoksen toiminnan aikana syntyvistä biojätteistä ja laitokselta tulevista jätevesistä, jotka johdettaisiin biokaasutuotanto laitteistoon. Yksi merkittävä vaihtoehto raaka-aineen eli rejektin hankintaan on paikallinen maatalous, jossa syntyy huomattavia määriä biokaasun tuotantoon soveltuvaa raaka-ainetta. Keskitettynä ratkaisuna voidaan ajatella biokaasulaitosta, jossa laitoksen omat biojätteet sekä useiden lähialueiden maatalojen tuottama materiaali kerättäisiin yhteen suuren laitokseen. Keskittämällä kaasuntuotanto suureen ja tehokkaasti toimivaan biokaasulaitokseen nostaisi se kapasiteettia sekä laskisi yksikkökustannuksia (47, s. 38). Prosessin läpikäynyt raaka-aine voitaisiin jakaa takaisin maatalojen käyttöön lannoitteeksi, aivan kuten se käytettäisiin normaalissakin tapauksessa ilman biokaasutuotantoa.

Voimalaitoksessa lämmenneen jäähdytysveden käyttö sellaisenaan ei käy biokaasuprosessin lämmitykseen, sillä lämmön on oltava säädettävissä ja tasaisesti saatavilla. Siksi prosessin lämmittäminen suoraan jäähdytysveden vaihtelevalla lämmöllä ei ole mahdollista. Vaihtoehdoksi jää lämmön talteenotto ja lämpötilan nosto lämpöpumpun avulla halutulle tasolle.

Ydinvoimalan läheisyyteen sijoitetun biovoimalan edellytyksenä olisi, että lämpöenergiaprosessiin saataisiin laitoksen jäähdytysvedestä lämpöpumpun avulla. Biokaasun tuotannossa yksi olennaisimmista asioista on lämpötila: mitä korkeampi lämpötila on, sitä nopeammin kemialliset ja biologiset reaktiot tapahtuvat (47, s. 5). Biokaasuprosessit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan käytettävän lämpötila-alueen perusteella:

- Psykrofiilisessa prosessissa metaanin muodostuminen tapahtuu alle +25 C°:n lämpötiloissa, mutta ongelmana on kuitenkin vähäinen ja hidas kaasun muodostuminen. (47, s. 5.)
- Mesofiilinen metaanin muodostus tapahtuu +32–42 C°:n välisellä lämpötila alueella. Kaasua muodostuu hyvin ja prosessi on toiminnaltaan vakaa. Useimmat biokaasulaitokset toimivat juuri mesofiilisella alueella johdettujen sen soveltuvuudesta erityisesti tuotantoeläinten ulosteiden mädätykseen. (47, s. 5.)
- Termofiilinen mädätys tapahtuu noin +50–60 C°:n asteen lämpötiloissa, jolloin hajoaminen on noin puolet nopeampaa kuin mesofiilisessa prosessissa. Termofiilinen prosessi on kuitenkin herkempi häiriöille kuin muut mädätysprosessit. (47, s. 5.) Termofiilisen prosessin etuihin lukeutuu myös käsitellyn materiaalin tehokas hygienisoituminen, joka on tärkeää ajatellen hajoamisjäännöksen loppukäyttöä esimerkiksi lannoitteena. (47, s. 31.)

### 5.5.1 Biokaasu

Biokaasu koostuu pitkälti metaanista CH<sub>4</sub> 55–70%, hiilidioksidista CO<sub>2</sub> 30–40%, typestä N<sub>2</sub> <1 % ja rikkivedystä 10–40 ppm (47, s. 3). Biokaasua voidaan tuottaa monista eri materiaaleista. Biokaasun tärkeimmän komponentin, eli metaanin, tuotto vaihtelee huomattavasti sen mukaan mitä mädätettävä materiaali on (taulukko 19). Märkäpainokiloa kohden mahdollisesti saatavilla olevista materiaaleista biojäte on kasvisbiomassan ohella metaanintuotantopotentiaailtaan paras. Lietteiden ja lannan potentiaali on sen sijaan heikompi niiden alhaiseen kuiva-ainepitoisuuden vuoksi. (47, s. 19).

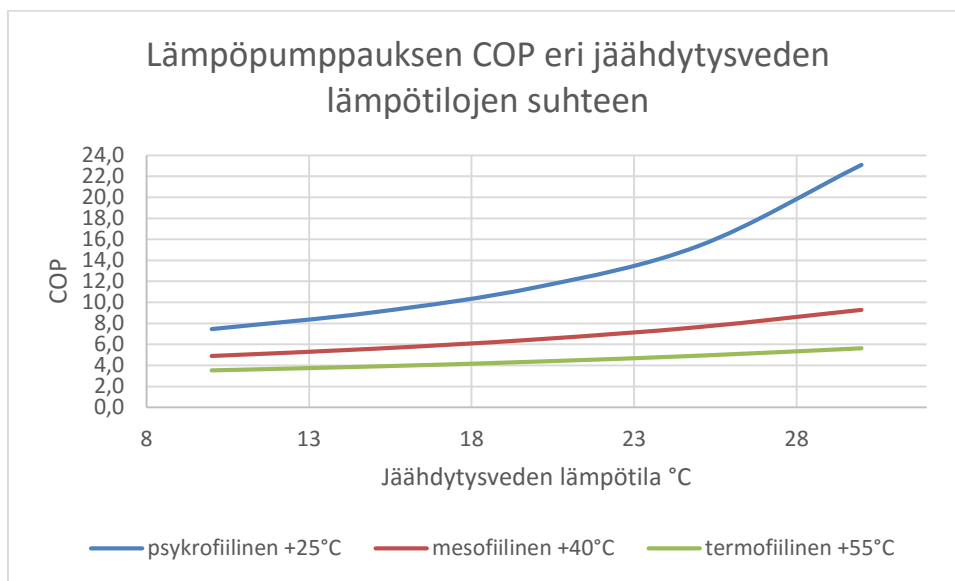
TAULUKKO 19. Määdettävien materiaalien metaanintuotantopotentiaali (47, s. 19)

Materiaali	Metaanintuotantopotentiaali	
	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tonni orgaanista ainetta	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tonni märkäpaino
Teurasjäte	570	150
Biojäte	500-600	100-150
Kasvibiomassa	300-450	30-150
Jätevesipuhdistamon liete	200-400	5-15
Lehmänlanta	100-250	7-14
Sianlanta	300-400	17-22

### 5.5.2 Lämpöpumppaus biokaasuvoimalaan

Lämpöpumpun avulla toteutetun biokaasuprosessin lämmityksen kannattavuuteen vaikuttaa olennaisesti saavutettava COP-luku. Tästä syystä onkin ensin tarkasteltava eri prosessilämpötiloilla saavutettavia lämpösuhdetta. Laskiessa esimerkkejä eri biokaasuprosesseista käytetään psykrofiilisen prosessin lämmöntarpeena +25 °C, mesofiilisen +40 °C ja termofiilisen +55 °C.

COP-luvun avulla voidaan määrittää tarvitun sähköenergian määrä, joka on suurin yksittäinen kaasun tuotantokustannustekijä. COP-luvun laskenta suoritetaan kaavalla 2. ja Coolpack-ohjelmistoa apuna käyttäen. Häviötekijöiksi ja as-teisuuksiksi on oletettu samat arvot kuin kappaleessa 4.2.2. Lasketuista COP-luvuista voidaan muodostaa kuvaaja (kuva 14), josta nähdään jäähdytysveden lämpötilan vaihteluvälillä saavutettava lämpösuhde eri prosessilämpötiloille.



KUVA 14. Lämpöpumpun COP-luku eri prosessilämpötiloille

Kun arvioidaan kuvan 14 perusteella eri prosessilämpötilojen soveltuvuutta tuotettavaksi lämpöpumpulla, voidaan huomata, että psykrofiilistä prosessia käyttämällä saavutettaisiin paras COP-luku. Psykrofiilisen prosessin hitaan kaasu- ja nestemuodostuksen vuoksi käytetään esimerkiksi kuitenkin mesofiilistä prosessia, mikä on yleisimmin käytetty biokaasun tuotantoprosessi.

Tehtäessä arviota kannattavuudesta otetaan vertailukohteeksi Suomessa toiminnassa oleva biokaasulaitos. Esimerkkinä on BioVakka Oy Vehmaan laitos, jossa käsiteltävänä materiaalina on sianlietettä ja jonkin verran teollisuuden sivutuotteita ja puhdistamolietetteitä. Käytettävän raaka-aineen määrä on yhteensä noin 120 000 tonnia vuodessa. Käytössä on mesofiilinen prosessi, jossa lämpötila pidetään noin +40 °C:ssa. Tuotettu kaasu poltetaan CHP-yksikössä ja sähköntuotannossa syntynyt lämpö käytetään prosessinlämmitykseen. Prosessinlämmitykseen kuluu vuoden aikana noin 3 000 MWh lämpöä. (47, s. 48.)

Mikäli vastaavanlainen biokaasulaitos toteutettaisiin Hanhikiven ydinvoimalaitoksen läheisyydessä, tarvittu lämpö voitaisiin tuottaa lämpöpumpulla voimalaitoksen jäähdytysvedestä. Lasketaan suuntaa-antava arvo lämpöpumpun kuluttamalle sähköenergian määrälle. Käytetään kuukausittaisia arvioituja jäähdytysveden lämpötiloja arvioitaessa lämpöpumpun COP-lukua (taulukko 20).

TAULUKKO 20. Lämpöpumpun COP-luvut eri kuukausina mesofiilista prosessia lämmittäessä

Kuukausi	Jäähdytysveden lämpötila °C	COP
tammi	9,8	4,9
helmi	9,8	4,9
maalis	10	4,9
huhti	10,5	5,0
touko	15	5,5
kesä	20	6,5
heinä	24	7,4
elo	28	8,6
syys	23	7,1
loka	19	6,3
marras	15	5,5
joulu	12,5	5,2
keskiarvo	16,4	6,0

Lämpöpumpulla tuotetaan prosessiin +40 °C:n lämpötila, jolloin vuoden keskimääräiseksi COP-luvuksi saadaan 6. Lasketun COP-luvun avulla voidaan laskea sähköenergiankulutus vuoden aikana:

$$3000Mwh/a \times \frac{1}{6} = 500Mwh/a.$$

Tuotetun biometaanin määrää voidaan arvioida taulukon 18 perusteella. Sianlannan metaanintuotantopotentiaali yhtä märkätonnia kohden on 17–22m<sup>3</sup>. Valitaan laskentaan arvo 20 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tonni. (47, s. 19) Todellisuudessa kaasua syntyy huomattavasti enemmän, sillä metaanin lisäksi biokaasun sisältää noin 30 % hiilidioksidia ja pieniä määriä muita kaasuja

$$\frac{20m^3CH_4}{tonni} \times 120\,000 \frac{t}{a} = 2\,400\,000 m^3/a.$$

Näin ollen voidaan laskea metaanin energiasisältö, kun tiedetään 1 m<sup>3</sup> biometaanin sisältävän energiaa noin 10 kWh (47, s. 19):

$$2\,400\,000 \frac{m^3}{a} \times 10 kWh = 24\,000\,000 \frac{kWh}{a} = 24\,000 MWh/a.$$

Tuotetun kaasun energiasisältöä voidaan verrata kulutettuun sähköenergiaan, jolloin kulutetun sähkön osuudeksi metaanin energiasisällöstä saadaan noin 2 %. Lisäksi on otettava huomioon sähkönkulutus, johon sisältyy laitteiston toiminta esimerkiksi sekoittimissa, puhaltimissa ja muissa laitteiston osissa. Yhteinelaskettuna niiden voidaan olettaa kuluttavan noin 10 % kokonaissähkön kulutuksesta, eli noin 50 MWh/a

$$\frac{500 MWh + 50 MWh}{24\,000 MWh} \times 100 \% = 2,3 \%$$

Sähkön omakustannehinnalla 50 €/MWh, tulisi vuotuiseksi lämpöpumpun kulutaman sähköenergiakustannukseksi noin 25 000 €. Jos sähkö ostettaisiin verkosta hintaan 80 €/MWh, olisi kustannus noin 40 000 €.

### 5.5.3 Biokaasun käyttö

Tuotetulle biokaasulle olisi suunniteltava käyttökohde, jotta sen tuottaminen olisi kannattavaa. Kaasu voidaan käyttää itse ja näin ollen korvata ostettavia polttoaineita tai myydä, jolloin siitä saadaan tuloja. Tuotettua kaasua voidaan kuitenkin joutua jalostamaan sen käyttötarkoituksen mukaan.

Lämmön ja sähkön tuotannossa kattilassa poltettaessa ei biokaasulla ole niin suuria puhtausvaatimuksia, mutta kaasun kuivaus on suositeltavaa, sillä se poistaa samalla myös suurimman osan mahdollisesta rikkivedystä. (47, s. 40.) Liikennepolttoaineeksi jalostettaessa tulee huomioda biokaasun sisältävän noin 30 % hiilidioksidia, joka on poistettava ennen käyttöä liikennepolttoaineena. EU-direktiivien mukaan metaanipitoisuus tulee biokaasussa olla vähintään 86 % liikennepolttoaine käytössä. (47, s.41.) Yleensä pyritään kuitenkin yli 90 %:n metaanipitoisuuteen. Hiilidioksidinpoistoon on olemassa useita eri keinoja, joista yleisin käytössä oleva menetelmä on vesipesu. Vesipesussa hiilidioksidi ja rikkivety liukenevat veteen ja jäljelle jää yli 90 prosentista biometaania. Kaasuun sitoutunut kosteus on myös poistettava kaasunkuivaimella. (48, s. 3.) Pelkkä pesu ja kuivaus eivät kuitenkaan riitä, jos biometaaniksi jalostettua kaasua halu-

taan käyttää auton polttoaineena. Sen paine on korotettava erillisessä laitteistossa noin 200 bar:n paineeseen. Paineenkorotus tulee tehdä, mikäli kaasua halutaan tankata autoihin (48, s. 8). Kaasun puhdistaminen ja varsinkin paineistaminen kuluttavat energiaa. Laitteiston investointikustannukset nousevat myös, mikäli kaasua halutaan jalostaa liikennepolttoaineeksi. Liikennekaasua voitaisiin myynnin lisäksi käyttää laitoksen omien autojen polttoaineena sekä jakaa maatilayrittäjille, jotka tuottavat biokaasuprosessin raaka-aineita.

Lasketaan liikennepolttoaineeksi jalostetun biometaanin rahallinen arvo kun tiedetään, että biometaanin tiheys on  $0,717 \text{ kg/m}^3$  (27, s. 179). Esimerkkitalanteessa voidaan laskea tuotetun kaasun massaksi vuodessa noin 1 720 800 kg. Energiasisällöltään yksi kilogramma metaania vastaa noin 1,55 litraa bensiiniä, joten bensiinin määräksi muutettuna metaanin energia vastaa noin 2 667 240 litraa bensiiniä. Arvioidaan kaasun hintaa Gasumin myymän kaasun hinnalla. Gasum myy biokaasua hintaan 1,45 €/kg, joka on arvonnlisäveron vähennyksen jälkeen 1,17 €/kg (49). Esimerkkitalanteessa tuotetun kaasun arvoksi saataisiin siis noin 2 miljoona euroa.

Toinen vaihtoehto on käyttää tai myydä kaasua lähes sellaisenaan sähkön tuotantoon, jolloin kaasua ei tarvitse käsitellä kuivausta ja rikkivedyn poistoa enempää. Biokaasua voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitoksissa samaan tapaan kuin maakaasua, koska molemmat koostuvat pitkälti metaanista. Siksi biokaasun hintaa voidaankin verrata maakaasun hintaan. Maakaasun hinta on tilastokeskuksen mukaan voimalaitospolttoaineena ollut kesällä 2015 noin 36 €/MWh (45). Arvioitaessa biokaasun olevan hieman halvempaa huonomman puhtauden takia ja myytäessä sitä esimerkiksi hintaan 30 €/MWh, saadaan tuotetun kaasun arvoksi noin 720 000 €.

Mikäli halutaan tuottaa sähköä, on biokaasua mahdollista käyttää polttomootorissa, jolla pyritetään generaattoria sähkön tuottamiseksi. Suurissa polttomootoreissa sähköntuotannon hyötysuhteeksi voidaan saada noin 30–40% (47, s. 40). Mikäli kaikki tuotettu kaasua käytettäisiin polttomootorissa ja sähkön tuotannon hyötysuhde olisi 35 %, saataisiin tuotetun sähkön arvoksi noin 420 000 €.

Kaasu voidaan polttaa myös CHP-laitteistossa, jonka kokonaishyötysuhde on noin 90 %, josta 30–35 % on sähköä ja loput lämpöä (47, s. 40). Investointina CHP-laitteisto on kuitenkin huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi polttomootori, jolla tuotetaan ainoastaan sähköä. Lisäksi lämmölle ei ole laitosalueen rakennusten lämmitystä lukuun ottamatta juurikaan käyttöä, mikäli biokaasuprosessin lämmitystarve halutaan toteuttaa jäähdytysveden lämpöä hyväksikäyttämällä.

Tehdään yksinkertainen laskelma siitä, kuinka paljon kaasua kuluu lämmitykseen, mikäli lämpöpumppausta ei hyödynnettäisi, vaan lämpö tuotettaisiin jollain toisella menetelmällä. Mikäli biokaasuprosessia lämmitettäisiin yksinkertaisessa lämmityskattilassa tuotettua kaasua polttamalla, kuluu lämmitykseen noin 3 300 MWh kaasun energiaa. Kaasun hinnalla 30 €/MWh tulisi lämmityskustannukseksi vuodessa menetetyn kaasun muodossa noin 100 000 €, joka on huomattavasti suurempi summa verrattuna lämpöpumpun arvioituihin sähkökustannuksiin, jotka ovat noin 25 000 €. Kaasukattilan investointikustannukset sen sijaan ovat pienemmät verrattuna lämpöpumppuun. Vuotuisen kulutuksen 3 300 MWh perusteella arvioidaan, että keskimääräinen lämpöteho on noin 400 kW. esimerkiksi kaksi 200 kW Arimax E 200 LV kaasukattilaa maksaa noin 18 400 € alv. 0 % (50). Vastaavan tehoisen lämpöpumpun, jolla voidaan tuottaa + 55 °C lämpöä, maksaa Calefan toteuttamana on noin 100 000 € alv. 0 %. (Liite 10.) Hintaero on kohtuullisen suuri, mutta jos verrataan lämpöpumpulla saavutettua vuotuista säästöä 72 000 €, tulee tässä esimerkkitapauksessa lämpöpumppu halvemmaksi jo muutamassa vuodessa, vaikka kustannuksia lisäisi esimerkiksi lämpöpumpulle tuotavan jäähdytysveden putkistoiden rakentamiskustannukset.

Yhteenvetona biokaasun tuotannosta voidaan sanoa, että jäähdytysveden käyttäminen biokaasun tuotantoon voisi olla yksi mahdollinen keino hyödyntää ydinvoimalan hukkalämpöä. Biokaasulaitos tulisi kuitenkin voida sijoittaa suoja-  
vyöhykkeen sisäpuolelle ydinvoimalan läheisyyteen. Lyhyt etäisyys lämmönlähteestä on edellytys, jotta lämmönsiirron aiheuttamat häviöt ja kustannukset eivät



nousisi kohtuuttomiksi. Lisäksi biokaasulaitoksen tarvitsemaa raaka-ainetta tulisi olla saatavilla ympäröivästä maataloudesta sopimuksella, josta kaikki osapuolet hyötyisivät.

## **5.6 Urheilupuiston lämmitys**

Ydinvoimala tulee työllistämään paljon henkilöstöä ja virkistyspalveluiden tuottaminen henkilöstölle voi tulla ajankohtaiseksi. Virkistyspalveluiden tuottamiselle voidaan lisätä työhyvinvointia ja näin ollen työssäjaksamista. Virkistyspalveluilla olisi positiivisia vaikutuksia ihmisten työhyvinvointiin sekä jaksamiseen.

Virkistyspalveluiden tuottaminen, kuten uimahallin ylläpito, vaatii suuria määriä energiaa. Tässä tapauksessa ydinvoimalan jäähdytysvettä voitaisiin hyödyntää uima-altaiden veden lämmitykseen. Altaiden vesi voitaisiin lämmittää lämpöpumpulla hyödyntäen jäähdytysveden lämpöä, samaan tapaan kuin voimalaitosalueen rakennuksia. Lämpöpumpulla tuotettu lämmitys toimisi pitkältikin samalla hyötysuhteella kuin rakennuksiakin lämmittäessä, sillä veden lämpötilat ovat samaa luokkaa kuin rakennusten lämmityksessäkin. Esimerkiksi normaaleissa uima-altaissa olevan veden lämpötila on noin +26 °C (51).

Samoin perustein voitaisiin rakentaa myös muita liikuntapaikkoja kuten palloiluhalli. Lämmityskustannukset pysyisivät matalina lämpöpumppausta hyödyntämällä. Jäähdytysveden hyödyntäminen lämpöpumpulla liikuntapaikkojen lämmitykseen edellyttäisi kuitenkin rakennusten tuomista hyvin lähelle ydinvoimalaitosta, jotta lämpöä ei tarvitsisi siirtää pitkiä matkoja. Tätä kuitenkin rajoittaa asetus, jonka mukaan 5 km suojaetäisyyden sisälle ei saa rakentaa tiloja, joissa oleskelee huomattavia ihmismääriä (1, s. 185).

Yhteenvedona voidaan urheilupaikkojen lämmityksestä todeta, että mikäli sellaisia tulee tarvetta rakentaa, kannattaa ne sijoittaa mahdollisimman lähelle voimalaitosta, jotta niiden lämmittämiseen jäähdytysveden lämpöenergiaa voidaan hyödyntää. Lämpöpumpulla voidaan silloin tuottaa erittäin edullista lämpöä halutun urheilupaikan lämmitykseen, minkä avulla urheilupaikan käyttökustannuksia voidaan madaltaa. Matalien käyttökustannusten ansiosta kiinnostus rakentaa liikuntapaikkoja voi kasvaa.

## 6 YHTEENVETO

Tässä työssä oli tarkoituksena suunnitella, kartoittaa ja ideoida erilaisia vaihtoehtoja ydinvoimalaitoksen jäähdytysveden lämpöenergian hyödyntämiselle.

Työssä esitettyjen ideoiden pohjalta Fennovoima Oy:n on mahdollista tutkia potentiaalisimmiksi osoittautuneita käyttökohteita ja tekniikoita sekä mahdollisesti toteuttaa niitä käytännössä.

Selvitystyössä tehtyjen laskelmien ja arvioiden pohjalta voidaan sanoa, että jäähdytysveden lämpöenergian käyttö suoraan sellaisenaan on vaikeaa ja käyttökohteet ovat vähäisiä. Parhaana vaihtoehtona jäähdytysveden suoralle käytölle on pumpata sitä suoraan jäähdytysveden ottokanavaan talvella, jolloin estetään alijäähtyneen veden riski jäätymä imukanavaan.

Jäähdytysveden lämpöenergiaa on suhteellisen helppo hyödyntää lämpöpumpauksella, jossa matalalämpöistä energiaa muutetaan paremmin käytettävissä olevaan muotoon. Tuotettua lämpöä voitaisiin käyttää monissa eri käyttökohteissa hyödyksi ja näin ollen säästää energiakustannuksia. Arvioitaessa kannattavuutta tuli selvästi esille, että lämmön käyttöpaikan pitäisi olla mahdollisimman lähellä voimalaitosta. Välittömässä läheisyydessä lämpöä käytettäessä syntyvät kulut sekä häviöt pysyisivät mahdollisimman alhaisina ja toiminta olisi kannattavaa. Tästäkin syystä paras vaihtoehto jäähdytysveden hyödyntämiseen olisi käyttää lämpöpumpulla tuotettua lämpöä laitosalueen rakennusten lämmitykseen. Jäähdytysveden hyödyntäminen lämpöpumpulla rakennusten lämmitykseen mahdollistaisi suuren säästön lämmityskuluissa verrattuna suoralla sähkölämmityksellä toteutettuun vaihtoehtoon. Toinen yksinkertaisesti toteutettavissa oleva vaihtoehto olisi käyttää jäähdytysveden lämpöenergiaa lämpöpumpun avulla piha-alueiden sulanapitoon talvella, mikä vähentäisi auras- ja hiekoitus-kustannusten lisäksi tapaturmariskiä, kuten liukastumisia.

Muita mahdollisia käyttökohteita lämmölle olisi esimerkiksi ympärivuotinen kasvihuone tai biokaasulaitos, joissa merkittävä määrä lämpöenergiaa käytetään tuotannon mahdollistamiseen. Suuren lämmönkulutuksen takia on lämmitysku-

luilla suuri vaikutus kannattavuuteen. Siksi jäähdytysvettä hyödyntävä lämpöpumppu on erinomainen vaihtoehto, koska sillä tuotettu lämpö on edullisempaa kuin muilla yleisesti käytetyillä lämmitysmuodoilla. Kasvihuoneen tai biokaasulaitoksen rakentaminen olisi kuitenkin suuri projekti, joka vaatisi isoja investointeja. Se ei myöskään suoraan liity Fennovoiman pääasialliseen liiketoimintaan. Sen vuoksi olisi perusteltua hankkia yhteistyöyhtiö, joka hoitaisi toimintaa.

Työssä toteutuskelpoisiksi todettujen ideoita on vielä tutkittava lisää, mikäli ideoita aletaan toteuttaa käytännössä. Käytännön toteutukseen vaikuttaa huomattava määrä muuttujia, joita on haastavaa arvioida tai kartoittaa etukäteen. Työssä tehdyissä laskelmissa on tehty paljon arviointia, koska esimerkiksi lämpöpumppuja laskettaessa eri toimittajien käyttämä tekniikka vaikuttaa hyötysuhteeseen huomattavasti. Lämmön käyttökohteiden ominaisuudet perustuivat myös lähteistä saadun tiedon pohjalta arviointiin. Tekemäni arviot antavat kuitenkin hyvän ja kattavan perustan lisätutkimuksille.

## LÄHTEET

1. Ydinvoimalaitoksen ympäristövaikutusten arviointiselostus. 2014. Fennovoima. Saatavissa: [http://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/doc/yva/yva2013/YVA\\_selostus\\_2014\\_FI\\_low.pdf](http://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/doc/yva/yva2013/YVA_selostus_2014_FI_low.pdf). Hakupäivä 5.10.2015.
2. Ydinvoimalan toiminta. Fennovoima Oy. Saatavissa: <http://www.fennovoima.fi/fennovoima/ydinvoima/ydinvoimalan-toiminta>. Hakupäivä 30.10.2015.
3. Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä Tuomas – Urpalainen Samu 2013. Voimalaitostekniikka. 2. tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.
4. Statusreport 108 - VVER-1200 (V-491) (VVER-1200 (V-491)) 2011. IAEA. Saatavissa: [https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200\(V-491\).pdf](https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200(V-491).pdf). Hakupäivä 21.10.2015.
5. Tanhuanpää, M 2015. TVO. VS: Ydinvoimalan jäähdytysveden hyötykäyttö. Sähköposti. Vastaanottaja: Lari Korkiakoski. 21.10.2015.
6. Motiva Lämpöpumput muuttavat teollisuuden hukkalämmön hyödyksi. 2013. Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/ajankohtaista/motivan\\_tiedotteet/2013/lampopumput\\_muuttavat\\_teollisuuden\\_hukkalammon\\_hyodyksi.6038.news](http://www.motiva.fi/ajankohtaista/motivan_tiedotteet/2013/lampopumput_muuttavat_teollisuuden_hukkalammon_hyodyksi.6038.news). Hakupäivä 27.3.2015.
7. Lämpöpumput. 2015. Helsinki: Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/lampopumput](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampopumput) Hakupäivä 5.10.2015.
8. Maaskola, Ilkka – Kataikko, Matti 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen lämpöpumppu ja ORC-sovellukset. Helsinki: Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Lampopumppu-ja\\_ORC-sovellukset.pdf](http://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu-ja_ORC-sovellukset.pdf). Hakupäivä 2.9.2015.
9. Kakolanmäen alla tuotetaan ekologista energiaa. 2012. Elomatic News 12/08. Saatavissa: [http://www.chemitec.fi/uploads/files/elomatic\\_news\\_12\\_08\\_fin\\_p8-9.pdf](http://www.chemitec.fi/uploads/files/elomatic_news_12_08_fin_p8-9.pdf). Hakupäivä 14.10.2015.
10. Aittomäki, Antero – Aalto, Esa – Alijoki, Tapio – Hakala, Pertti – Hirvelä, Aulis – Kaappola, Esa – Mentula, Jukka – Seinelä, Antti 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

11. Perälä, Rae 2009. Lämpöpumput suomalainen käsikirja aikamme lämmitys-järjestelmästä Helsinki: Alfamer Oy.
12. Hakala, Pertti – Kaappola, Esko. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. Opetus-hallitus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
13. Veolia Invest in heat pumps. Veolia. Saatavissa: <http://www.veoliawater2energy.com/en/references/heat-pumps/>. Hakupäivä 9.4.2015.
14. Eskola, Lari – Jokisalo, Juha – Siren, Kai 2012. Lämpöpumppujen energia-laskentaopas. Suomen rakennusmääräyskokoelma. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B10A732A6-EA2F-45F9-869C-6F909138CB26%7D/30757>. Hakupäivä 14.10.2015.
15. Moran, Michael – Shapiro, Howard – Boettner, Daisy – Bailey, Margaret 2012. Principles of engineering thermodynamics seventh edition. Wiley.
16. Coolpack. Version 1,50 2012. IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.
17. Aho, Ilari – Laitinen, Ari 1989. Absorptiolämpöpumppu öljylämmitysjärjestelmissä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tiedotteita. Espoo: VTT.
18. Hietamäki, M. 2015. Ydintekniikan asiantuntija. Fennovoima Oy. Keskustelua opinnäytetyöstä. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Lari Korkiakoski. 15.9.2015.
19. Hietamäki, M. 2015. Ydintekniikan asiantuntija. Fennovoima Oy. Keskustelua opinnäytetyöstä. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Lari Korkiakoski. 27.3.2015.
20. Mäkelä, Veli-Matti – Tuurnanen, Jarmo 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Oppimateriaali. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1> Hakupäivä 14.10.2015.
21. D3 (2012) 2011. Rakennusten Energiatohokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: [https://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012\\_Suomi.pdf](https://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf). Hakupäivä 14.10.2015.
22. Lämmitystarveluvut vertailukaudella 1981–2010. 2014. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>. Hakupäivä 3.4.2015.

23. Laskukaavat lämmin käyttövesi. 2015. Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/energiankayton\\_tehostaminen/kiinteistojen\\_energian\\_hallinta/kulutuksen\\_normitus/laskukaavat\\_lammin\\_kayttovesi](http://www.motiva.fi/julkinen_sektori/energiankayton_tehostaminen/kiinteistojen_energian_hallinta/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi) Hakupäivä 30.9.2015.
24. Energiatehokkuus. 2015. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: <https://www.tem.fi/energia/energiatehokkuus>. Hakupäivä 29.9.
25. Matalaenergiatalon määritelmiä. 2015. Helsinki: Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/rakentaminen/millainen\\_on\\_energiatehokas\\_pientalo/matalaenergiatalon\\_maaritelmia](http://www.motiva.fi/rakentaminen/millainen_on_energiatehokas_pientalo/matalaenergiatalon_maaritelmia). Hakupäivä 8.4.2015.
26. Jokiranta, Minna 2010. Pohjois-Suomessa sijaitsevien matalaenergialomarakennusten energiankulutus ja lämpöolot. Diplomityö. Espoo Aalto-yliopiston teknillinen Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta Energiatekniikan laitos.
27. Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani. 2010. Tekniikan kaavasto 8.painos. Tammertekniikka. Hämeenlinna: Kariston kirjapaino Oy.
28. D5 2012. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BD5F2B6F84-2CF9-4C43-9D76-9B04C7AF1D72%7D/30748>. Hakupäivä 20.10.2015.
29. Hietamäki, M. Ydintekniikan asiantuntija, Fennovoima Oy. Opinnäytetyöpalaverit ja keskustelut vuoden 2015 aikana.
30. Alpua, J. Oilon Scancool Oy. 2015. Lämpöpumppujen hinta-arvio. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Lari Korkiakoski. 12.10.2015.
31. Calefa lämpöpumpun kannattavuuslaskuri. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/kannattavuuslaskuri/>. Hakupäivä 15.10.2015.
32. Alanen, Raili – Koljonen, Tiina – Hukari, Sirpa – Saari, Pekka 2003. Energian varastoinnin nykytila. Espoo: VTT Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>. Hakupäivä 13.5.2015.
33. What is OTEC. 2013. OTEC foundation. Saatavissa: <http://www.otec-news.org/what-is-otec/> Hakupäivä 7.9.2015.

34. Hawaii First to Harness Deep-Ocean Temperatures for Power. 2015. Scientific American 27.8.2015. Saatavilla: <http://www.scientificamerican.com/article/hawaii-first-to-harness-deep-ocean-temperatures-for-power/>. Hakupäivä 7.9.2015.
35. Sipilä, Kari – Kirjavainen, Miikka – Ritola, Jouko – Kivikoski, Harri 2001. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Kesäkeli projekti. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2113.pdf>. Hakupäivä 14.10.2015.
36. Turvallisuusperiaatteet ja ulkoiset uhat. 2011. Liite 2. Säteilyturvakeskus. Saatavissa: [https://www.tem.fi/files/29917/4\\_TEM-selvitysraportti\\_Liite2.pdf](https://www.tem.fi/files/29917/4_TEM-selvitysraportti_Liite2.pdf). Hakupäivä 1.9.2015.
37. Westerlund, Kim 2005. Kasvihuoneiden energiankulutus Suomessa. Raportti. Vaasa: Svenska Yrkehögskolan. Saatavissa [http://www.energiategohokkuussopimukset.fi/midcom-serveattachmentguid-1e0c4e30062e668c4e311e09d19451d02ba9f899f89/kasvihuoneiden\\_energiankulutus\\_suomessa.pdf](http://www.energiategohokkuussopimukset.fi/midcom-serveattachmentguid-1e0c4e30062e668c4e311e09d19451d02ba9f899f89/kasvihuoneiden_energiankulutus_suomessa.pdf). Hakupäivä 28.3.2015.
38. Tilasto Energian hinnat. 2. Vuosineljännes 2015. Liitetaulukko 2. Energian hintoja lämmöntuotannossa kesäkuussa 2015 . Helsinki: Tilastokeskus Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi\\_2015\\_02\\_2015-09-17\\_tau\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_tau_002_fi.html). Hakupäivä 19.10.2015.
39. Tilasto Energian hinnat. 2. Vuosineljännes 2015. Liitekuvio 5. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi\\_2015\\_02\\_2015-09-17\\_kuv\\_005\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_kuv_005_fi.html). Hakupäivä 19.10.2015.
40. Kotituli, hinnastot hakekattila SET Futura 250kW. Saatavissa: [http://koti-tuli.fi/index.php?main\\_page=product\\_info&cPath=2&products\\_id=1007](http://koti-tuli.fi/index.php?main_page=product_info&cPath=2&products_id=1007). Hakupäivä 1.11.2015.
41. Maanalaisten kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset. 2014. Energiategollisuus. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/images/johtorakennuskustannukset\\_2014.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/images/johtorakennuskustannukset_2014.pdf). Hakupäivä 12.10.2015.
42. Lepistö, Tanja 2010. Laatuhaakkeen tuotanto-opas. Metsäkeskus Eteläpohjanmaan. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.puula-keus.net/docs/109-FsT-laatuhaakeopas.pdf>. Hakupäivä 14.10.2015.

43. Kauppinen, Veli-Pekka 2014. Puupolttoaineen kuivuriopas. Suomen metsäkeskus. Saatavissa: <http://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/kuivuriopas-web.pdf>. Hakupäivä 20.10.2015.
44. Hakonen, Tuomas – Laurila, Jussi 2011. Metsähakkeen kosteuden vaikutus polton ja kaukokuljetuksen kannattavuuteen. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja. Saatavissa: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34746/B55.pdf?sequence=1>. Hakupäivä 2.10.2015.
45. Tilasto: Energian hinnat 2. Vuosineljännes 2015. Liitekuvio 3. Voimalaitospolttoaineiden hinnat lämmöntuotannossa. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi\\_2015\\_02\\_2015-09-17\\_kuv\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_kuv_003_fi.html). Hakupäivä 2.10.2015.
46. Biokaasun tuotanto maatilalla. 2013. Helsinki: Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](http://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf). Hakupäivä 14.10.2015.
47. Lehtomäki, Annimari – Paavola, Teija – Luostarinen, Sari – Rintala, Jukka 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylä: Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitos.
48. Aalto, Mikko 2011. Biokaasu liikennepolttoaineena. Opintomateriaali OAMK. Saatavissa: [http://www.oamk.fi/hankkeet/bioenergia/biog/docs/biokaasu\\_liikennepolttoaineena.pdf](http://www.oamk.fi/hankkeet/bioenergia/biog/docs/biokaasu_liikennepolttoaineena.pdf). Hakupäivä 7.10.2015.
49. Maa- ja biokaasun hinnat alenivat Gasumin kaasutankkausasemilla 2015. Tiedotteita Gasum Oy. Saatavissa: [http://www.gasum.fi/Tietoa\\_Gasumista/Uutiset/maa-ja-biokaasun-hinnat-alenivat-gasumin-kaasutankkausasemilla/](http://www.gasum.fi/Tietoa_Gasumista/Uutiset/maa-ja-biokaasun-hinnat-alenivat-gasumin-kaasutankkausasemilla/). Hakupäivä 7.10.2015.
50. Tuotehinnasto Ariterm. 2015. Saatavissa: <http://www.ariterm.fi/app/uploads/2015/04/Pien-ja-kiinteist%C3%B6kattilat-tuotehinnasto-1.4.2015.pdf>. Hakupäivä 25.10.2015.
51. Julkiset uima-altaat. 2015. Prominent. Saatavissa: <http://www.prominent.fi/Teolliset-sovellukset/Uima-altaat/Julkiset-uima-altaat.aspx>. Hakupäivä 5.5.2015.

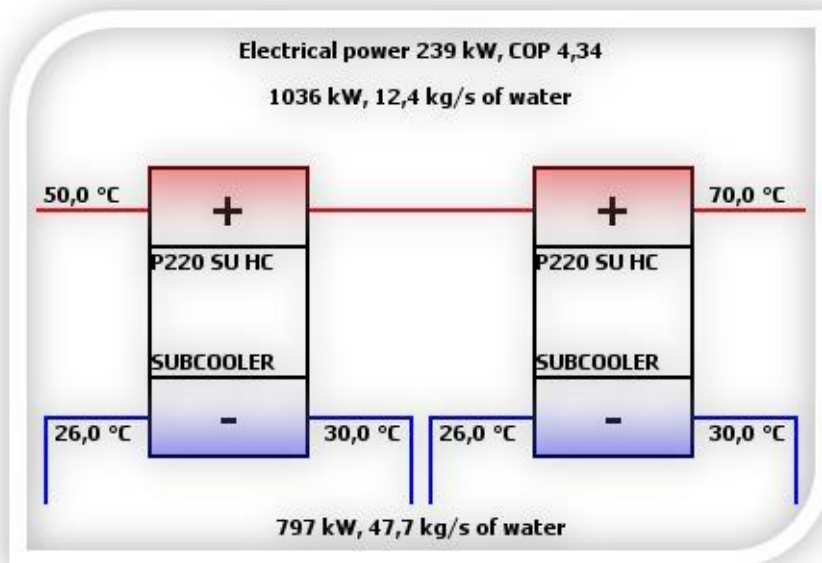


## LIITTEET

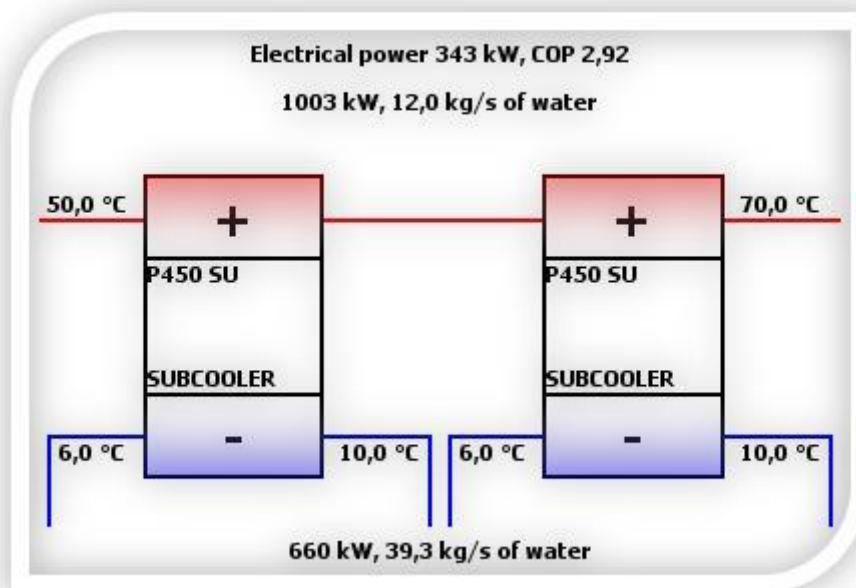
## LÄHTÖTIETOMUISTIO

Työn tiedot	Tekijä <sup>1</sup> Lari Korkiakoski	Tilaaja <sup>2</sup> Fennovoima Oy
Tilaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot <sup>3</sup> [REDACTED]		
Työn nimi <sup>4</sup> <b>Hanhikivi 1 ydinvoimalan jäähdytysveden lämpöenergian hyötykäyttö lähialueella</b>		
Työn kuvaus <sup>5</sup> Hanhikivi 1 ydinvoimalan tuottaa käydessään lämpöä 3200MW:n teholla, josta sähköntuotannossa voidaan hyödyntää noin 1200MW:n teho. Loppu lämpöteho eli noin 2000MW johdetaan jäähdytysveden mukana mereen. Työssä kartoitetaan vaihtoehtoisia tekniikoita ja mahdollisuuksia hyödyntää ydinvoimalasta tulevan jäähdytysveden lämpöenergiaa laitosalueella ja lähiympäristössä.		
Työn tavoitteet <sup>6</sup> Tavoitteena vertailla eri vaihtoehtoja sekä tekniikoita, joilla jäähdytysvedestä voidaan ottaa energiaa talteen, sekä selvittää niiden taloudellista kannattavuutta		
Tavoiteaikataulu <sup>7</sup> Työn tekninen osuus tavoitteena saada valmiiksi viimeistään kesäkuun puoleenväliin mennessä. Viimeistelyineen työ on tavoitteena olla valmis viimeistään syyskuun loppuun mennessä.		
Päiväys ja allekirjoitukset <sup>8</sup> 25 / 3 / 2015 Tekijän allekirjoitus [REDACTED] 27 / 3 / 2015 Tilaajan allekirjoitus [REDACTED]		

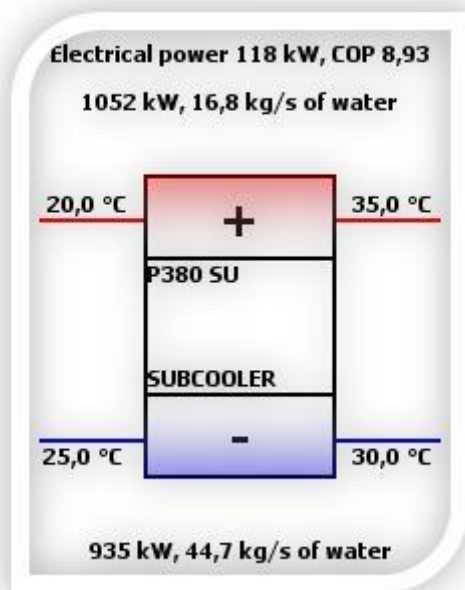
1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite.
2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi.
3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta.
4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan.
5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat.
6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet.
7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on väitavoitella, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja opillatoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laati oman aikataulunsa.
8. Lähtötietomuistio päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaajan yhdyshenkilö.



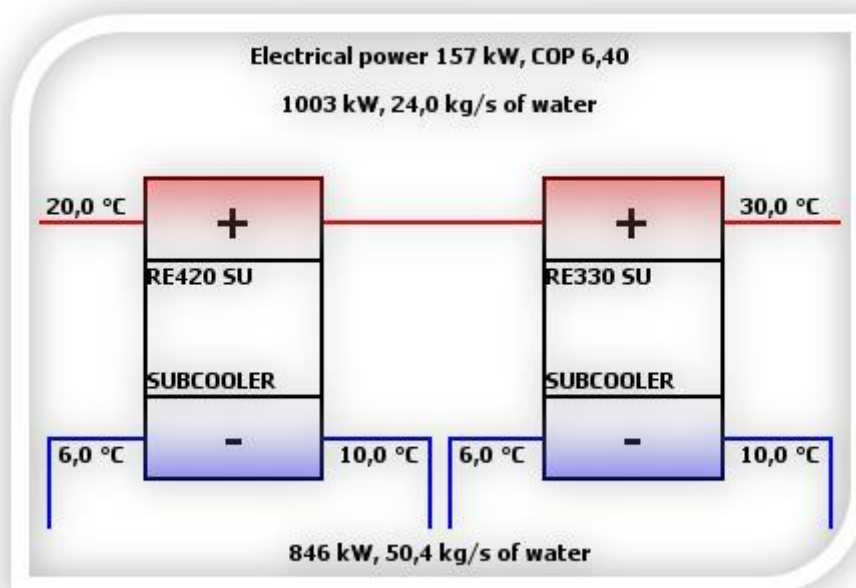
- 2xP220 SU HC: 124 400 € alv 0 %, EXW Kokkola



- 2xP450 SU: 178 200 € alv 0 %, EXW Kokkola




- P380 SU HC: 90 700 € alv 0 %, EXW Kokkola



- RE420 SU ja RE330 SU: 109 100 € alv 0 %, EXW Kokkola

16.10.2015

Calefa - Kiemmevuoheski



Calefa Oy

Keskikankaantie 21, FI-15860 Hollola

+ 358 10 2190 280

[www.calefa.fi](http://www.calefa.fi)

CALEFI® ENERGIANKIERRÄTYS

16.10.2015

Hukkateho

Hukkaenergian virtaama	42.0 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Hukkaenergian lämpöteho	704 kW

Laitteiston energian kulutus

Sähkäteho	327 kW
Sähkön kulutus vuodessa	2 863 MWh
Sähköä vuodessa	143 173 €

Saatava hyöty

Lämpöteho	1 010 kW
Lämpötila neste	70 °C
Lämpöpumpun COP	3.3
Lämpöenergia vuodessa	8 845 MWh
Lämpöenergian arvo	442 241 €

Säästö vuodessa	299 067 €
Investoinnin takaisinmaksuaika	0.8 vuotta
Investoinnin hinta Calefan toteutuksella	230 975 € *

Hinta sisältää täydellisen Calefi® Energiakierrätysjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefi® Energian kierrätysjärjestelmä:

- Energiasieppari
- Energiasovitin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huomi! Uusiutuvaa energiaa ja energian kulutusta vähentäville hankkeille on haettavissa investoittavuuksia. Nillä saattaa olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijoilta sekä ELY-keskuksesta ja Motivasta.

\* lopulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:

Marko Nieminen, myyntipäällikkö  
puh. 010 2190 283  
[marko.nieminen@calefa.fi](mailto:marko.nieminen@calefa.fi)


we renew your energy

<http://www.calefa.fi/kiemmevuoheski>

1/1

16.10.2015
Calefa - Kiemmevaalekuri

Calefa Oy  
Keski-Kankaantie 21, FI-15860 Hollola  
+358 10 2190 280  
[www.calefa.fi](http://www.calefa.fi)



**CALEFI® ENERGIANKIERRÄTYS**  
16.10.2015

**Hukkateho**

Hukkaenergian virtaama	104,0 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Hukkaenergian lämpöteho	1 743 kW

**Laitteiston energian kulutus**

Sähkäteho	490 kW
Sähkön kulutus vuodessa	4 293 MWh
Sähköä vuodessa	214 656 €

**Saatava hyöty**

Lämpöteho	2 181 kW
Lämpötila neste	45 °C
Lämpöpumpun COP	5,0
Lämpöenergia vuodessa	19 104 MWh
Lämpöenergian arvo	955 204 €

**Säästö vuodessa**

Investoinnin takaisinmaksuaika	0,5 vuotta
Investoinnin hinta Calefan toteutuksella	404 465 € *

Hinta sisältää täydellisen Calefi® Energiakierrätysjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefi® Energian kierrätysjärjestelmä:

- Energiasleppari
- Energiasovitin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huom! Uusiutuvaa energiaa ja energian kulutusta vähentävillä hankkeilla on haettavissa investointitukia. Niillä saattaa olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijolta sekä ELY-keskuksesta ja Motivasta.

\* lopulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:  
Marko Nieminen, myyntipäällikkö  
puh. 010 2190 283  
[marko.nieminen@calefa.fi](mailto:marko.nieminen@calefa.fi)

we renew your energy

<http://www.calefa.fi/kiemmevaalekuri/>
1/1

18.10.2015

Calefa - Kimmaturvakeskus



Calefa Oy  
Keskikankaantie 21, FI-15860 Hollola  
+358 10 2190 280  
[www.calefa.fi](http://www.calefa.fi)

**CALEFI® ENERGIANKIERRÄTYS**

16.10.2015

**Hukateho**

Hukkaenergian virtaama	88.0 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Hukkaenergian lämpöteho	1 475 kW

**Laitteiston energian kulutus**

Sähköteho	415 kW
Sähkön kulutus vuodessa	3 633 MWh
Sähköä vuodessa	181 632 €

**Saatava hyöty**

Lämpöteho	1 845 kW
Lämpötila neste	45 °C
Lämpöpumpun COP	5.0
Lämpöenergia vuodessa	16 165 MWh
Lämpöenergian arvo	808 250 €

**Säästö vuodessa**

626 618 €

**Investoinnin takaisinmaksuaika**

0.6 vuotta

**Investoinnin hinta Calefan toteutuksella**

346 086 € \*

Hinta sisältää täydellisen Calefi® Energiakierrätysjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefi® Energian kierrätysjärjestelmä:

- Energiasieppari
- Energiasovitin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huomi! Uusiutuvaa energiaa ja energian kulutusta vähentäville hankkeille on haettavissa investoibitukia. Niillä saattaa olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijoilta seidi ELY-keskuksesta ja Motivasta.

\* lojulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:

Marko Nieminen, myyntipäällikkö

puh. 010 2190 283

[marko.nieminen@calefa.fi](mailto:marko.nieminen@calefa.fi)

we renew your energy



18.10.2015

Calefa - Kiemmävuokauskuri



Calefa Oy  
Keskikankaantie 21, FI-15860 Hollola  
+ 358 10 2190 280  
[www.calefa.fi](http://www.calefa.fi)

### CALEFI® ENERGIANKIERRÄTYS 16.10.2015

#### Hukkateho

Hukkaenergian virtaama	60.0 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Hukkaenergian lämpöteho	1 006 kW

#### Laitteiston energian kulutus

Sähköteho	283 kW
Sähkön kulutus vuodessa	2 477 MWh
Sähköä vuodessa	123 840 €

#### Saatava hyöty

Lämpöteho	1 258 kW
Lämpötila neste	45 °C
Lämpöpumpun COP	5.0
Lämpöenergia vuodessa	11 022 MWh
Lämpöenergian arvo	551 079 €

Säästö vuodessa	427 239 €
Investoinnin takaisinmaksuaika	0.6 vuotta
Investoinnin hinta Calefan toteutuksella	243 922 € *

Hinta sisältää täydellisen Calefi® Energiakierrätysjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefi® Energian kierrätysjärjestelmä:

- Energiasieppari
- Energiasovitin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huom! Uusiutuvaa energiaa ja energian kulutusta vähentävillä hankkeilla on haettavissa investoittimia. Nillä saatava olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijoilta sekä ELY-keskuksista ja Motivasta.

\* lopulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:

Marko Nieminen, myyntipäällikkö

puh. 010 2190 283

[marko.nieminen@calefa.fi](mailto:marko.nieminen@calefa.fi)

we renew your energy

19.10.2015

Calefa - Kiemattavuuskeskuri



Calefa Oy  
Keskikankaantie 21, FI-15860 Hollola  
+ 358 10 2190 280  
[www.calefa.fi](http://www.calefa.fi)

## CALEFI® ENERGIANKIERRÄTYS 19.10.2015

### Hukateho

Hukkaenergian virtaama	7.5 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Hukkaenergian lämpöteho	126 kW

### Laitteiston energian kulutus

Sähkäteho	46 kW
Sähkön kulutus vuodessa	403 MWh
Sähköä vuodessa	20 165 €

### Saatava hyöty

Lämpöteho	168 kW
Lämpötila neste	60 °C
Lämpöpumpun COP	4.0
Lämpöenergia vuodessa	1 471 MWh
Lämpöenergian arvo	73 570 €

### Säästö vuodessa

53 405 €

### Investoinnin takaisinmaksuaika

1.1 vuotta

### Investoinnin hinta Calefan toteutuksella

57 250 € \*

Hinta sisältää täydellisen Calefi® Energiakierrätysjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefi® Energian kierrätysjärjestelmä:

- Energiasieppari
- Energiasovitin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huomi! Uusiutuvaa energiaa ja energian kulutusta vähentäville hankkeille on haettavissa investoittukia. Nillä saattaa olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijoilta sekä ELY-kesiuksesta ja Motivasta.

\* lopulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:

Marko Nieminen, myyntipäällikkö

puh. 010 2190 283

[marko.nieminen@calefa.fi](mailto:marko.nieminen@calefa.fi)

we renew your energy



20.10.2015

Calefa - Kiemattavuuskeskus



Calefa Oy  
Keskikankaantie 21, FI-15860 Hollola  
+ 358 10 2190 280  
[www.calefa.fi](http://www.calefa.fi)

## CALEFI® ENERGIANKIERRÄTYS 20.10.2015

### Hukateho

Hukkaenergian virtaama	12.0 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Hukkaenergian lämpöteho	201 kW

### Laitteiston energian kulutus

Sähköteho	61 kW
Sähkön kulutus vuodessa	536 MWh
Sähköä vuodessa	26 806 €

### Saatava hyöty

Lämpöteho	256 kW
Lämpötila neste	50 °C
Lämpöpumpun COP	4.6
Lämpöenergia vuodessa	2 245 MWh
Lämpöenergian arvo	110 009 €

### Säästö vuodessa

83 203 €

### Investoinnin takaisinmaksuaika

0.9 vuotta

### Investoinnin hinta Calefan toteutuksella

71 132 € \*

Hinta sisältää täydellisen Calefi® Energiakierrätysjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefi® Energian kierrätysjärjestelmä:

- Energiasieppari
- Energiasovitin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huomi! Uusiutuvaa energiaa ja energian kulutusta vähentäville hankkeille on haettavissa investointia. Nillä saattaa olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijoilta sekä ELY-kesiuksesta ja Motivasta.

\* lopulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:

Marko Nieminen, myyntipäällikkö  
puh. 010 2190 283  
[marko.nieminen@calefa.fi](mailto:marko.nieminen@calefa.fi)

we renew your energy

9.11.2015

Calefa - Kieräntevuolaskuri



Calefa Oy  
Keskikankaantie 21, FI-15860 Hollola  
+358 10 2190 280  
www.calefa.fi

### CALEFA® ENERGIAKIERÄNTÄJÄR- JÄRSTELMÄ 400 kW, 09.11.2015

#### Huokateho

Huokatehon virtaama	18,5 kg/s
Prosessin käyttöaika	24 h/vuorok.
Lämpötila ennen lämmöntalteenottoa	10 °C
Lämpötila talteenoton jälkeen	6 °C
Huokatehon lämpöteho	310 kW

#### Laitteiston energian kulutus

Sähköteho	103 kW
Sähkön kulutus vuodessa	902 MWh
Sähkön hinta vuodessa	45 107 €

#### Saatava hyöty

Lämpöteho	404 kW
Lämpötila neste	55 °C
Lämpöpumpun COP	4,3
Lämpöenergia vuodessa	3 537 MWh
Lämpöenergian arvo	176 839 €

Säästö vuodessa 131 732 €

Investoinnin takaisinmaksuaika 0,8 vuotta

Investoinnin hinta Calefan toteutuksella 100 096 €\*

Hinta sisältää täydellisen Calefa® Energiakieräntäjärjestelmän, asiakaskohtaisen suunnittelun, asennuksen ja käyttöönoton.

Calefa® Energiakieräntäjärjestelmä:

- Energiasieppari
- Energiasäädin
- Lämpöpumppu
- Putkisto varusteineen
- Automaatio ja sähköistys

Huom! Uusiutuva energia ja energian kulutus vähentävillä hankkeilla on haettavissa investoittavaksi. Nämä saattaa olla merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksuaikaan. Lisätietoja Calefan asiantuntijoilta sekä ELY-keskuksesta ja Motivasta.

\* lopulliseen investointikustannukseen vaikuttaa mm. etäisyydet, sijainti, automaation taso.

Calefa Oy ei vastaa näiden tulosten oikeellisuudesta.

Lisätietoja:

Marko Nieminen, myyntipäällikkö

puh. 010 2190 283

marko.nieminen@calefa.fi

we renew your energy



